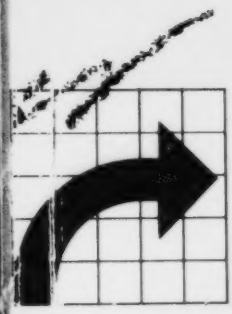
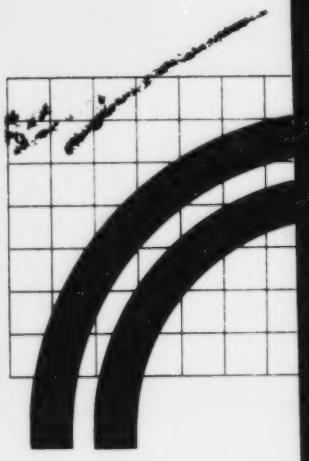
TP 5554 F

ÉTUDES ET RECHERCHES EN TRANSPORTS



BOGIE MÉCANO-SOUDÉ DESTINÉ AU TRANSPORT INTERURBAIN



ANDRÉ G. FONTAINE

TECHNOLOGIE ET INSTRUMENTATION

CA1
DTC 800
88
B55
c.2

Québec

Canada

89-04015/

Date Due

SEP 5 1989			

MMM
CA1
DTC300
88
B55
C.2

BOGIE MÉCANO-SOUDÉ DESTINÉ AU TRANSPORT INTERURBAIN

Rapport final phase I:
Étude conceptuelle

PRÉPARÉ DANS LE CADRE DE L'ENTENTE AUXILIAIRE
CANADA-QUÉBEC

SUR LE DÉVELOPPEMENT DES TRANSPORTS 1985-1990

VOLET RECHERCHE & DÉVELOPPEMENT

Library and Information Centre / Centre de Documentation (GSLA)
RECEIVED - REÇU LE
JAN 27 1989
Transport Canada / Transports Canada

Août 1988

407837

399515

Dépôt légal, 3e trimestre 1988
Bibliothèque nationale du Québec
ISBN 2-550-18918-3

Gouvernement du Québec
Ministère des Transports

FICHE ANALYTIQUE DE RAPPORT

Titre et sous-titre du rapport
Bogie mécano-soudé destiné au transport interurbain

N° du rapport Transports Québec
RTQ-87-18

Rapport d'étape ☐ Rapport final ☒ — An 87 | Mois 09 | Jour 18

N° du contrat

Auteur(s) du rapport
André G. Fontaine

Date du début d'étude 86 12 01 — **Date de fin d'étude** 87 08 30

Coût de l'étude
300 000 $

Étude ou recherche réalisée par (nom et adresse de l'organisme)
Bombardier Inc.
Division du transport en commun
1350, rue Nobel
Boucherville (Québec)

Étude ou recherche financée par (nom et adresse de l'organisme)
Ministère des Transports du Québec 75 000 $
Transports Canada 75 000 $
Bombardier Inc. 150 000 $

But de l'étude, recherche et renseignements supplémentaires
Etude de faisabilité d'un bogie mécano-soudé pour applications interurbaines à haute vitesse adaptable à des applications de banlieue. Etude préalable à la réalisation de la phase II sur le développement, la fabrication et l'essai de prototypes.

Résumé du rapport

Ce rapport résume le travail accompli au cours de la phase I du projet. C'est une étude conceptuelle qui vise à déterminer l'intérêt et la faisabilité d'un bogie de type mécano-soudé pour applications interurbaines et adaptable à des applications de banlieue.

Toutes les étapes et analyses qui ont permis d'en arriver à une configuration spécifique pour les différentes versions sont décrites dans ce rapport. Elles vont de l'étude du contexte actuel aux analyses de suspensions et de la structure (en passant par un examen des concepts existant dans d'autres pays), aux objectifs de conception, à la description du bogie et à son intégration à une caisse de voiture LRC.

La conclusion est à l'effet qu'il est possible de réaliser ces différentes versions et d'atteindre les objectifs que les concepteurs se sont fixés.

Nbre de pages	Nbre de photos	Nbre de figures	Nbre de tableaux	Nbre de références bibliographiques	Langue du document	Autre (spécifier)
	2	46	10		☒ Français ☐ Anglais	

Mots-clés
interface roue-rail, éléments finis, mécano-soudé, bogie, prototype, haute vitesse, interurbain, trains de banlieue, système d'inclinaison.

Autorisation de diffusion
☒ Diffusion autorisée ☐ Diffusion interdite

Signature du directeur général — Date 30 09 88

V-1773 (85-05)

Development Developpement

REPORT DOCUMENTATION FORM

1. Transport Canada Report No. TP8886F	2. TDC Project No. 6775
3. Recipient's Catalogue No.	
4. Title and Subtitle Bogie mécano-soudé destiné au transport interurbain	5. Report Date September 1987
	6. Performing Organization Report No.
7. Author(s) André G. Fontaine	8. Transport Canada File No. D1465-497
9. Performing Organization Name and Address	10. DSS File No. -
	11. DSS or Transport Canada Contract No. 6775
12. Sponsoring Agency Name and Address	13. Type of Report and Period Covered final
	14. Sponsoring Agency Code
15. Supplementary Notes	16. TDC Project Officer C.A. Versailles

17. Abstract

This report sums up the work done during the first phase of this project. This first phase includes a conceptual study of a fabricated high speed truck for intercity applications and convertible to commuter applications.

The report includes a study of existing high speed truck, design objectives and requirements, preliminary structural and dynamic analyses and a truck description.

From the results of this feasibility study, it is possible to design, built and test a truck which will meet the design objectives and requirements.

18. Key Words Interface roue-rail, éléments finis, mécano-soudé, bogie, prototype, haute vitesse, interurbain, trains de banlieue, système d'inclinaison	19. Distribution Statement

20. Security Classification (of this report)	21. Security Classification (of this page)	22. No. of Pages	23. Price

Canada

AVANT-PROPOS

ENTENTE AUXILIAIRE CANADA-QUÉBEC SUR LE DÉVELOPPEMENT DES TRANSPORTS

Le gouvernement du Canada et le gouvernement du Québec concluaient, le 14 décembre 1984, une entente de développement économique et régional dans laquelle les transports étaient reconnus comme l'une des priorités.

Découlant de cette entente sur le développement économique et régional, une entente auxiliaire sur le développement des transports fut conclue le 8 juillet 1985. Cette entente auxiliaire, qui doit prendre fin le 31 mars 1990, a pour but de favoriser la coordination des efforts du gouvernement du Canada et du gouvernement du Québec dans le domaine des transports, et ce afin d'appuyer le développement économique et régional en facilitant la circulation des personnes et des biens autant à l'intérieur qu'entre les différentes régions du Québec et du Canada de même qu'à l'étranger.

Parmi les cinq volets prévus dans l'entente auxiliaire, se retrouve un programme de recherche et développement dont l'objectif est d'augmenter et d'accélérer l'effort de recherche et de développement dans le domaine des transports au Québec en visant la préservation et l'amélioration des capacités manufacturières de ce secteur, de même que l'augmentation de la productivité du système de transport afin de s'assurer qu'il bénéficie des progrès techniques et soit compétitif.

Ce programme comporte quatre secteurs principaux:

- la technologie des systèmes de transport routier;
- la technologie des systèmes de transport ferroviaire;
- les applications de la micro-informatique et de la micro-électronique en transport;
- l'intermodalité des transports.

La présente publication, préparée en vertu de ce programme, est le rapport final d'un projet que le ministère des Transports du Canada et le ministère des Transports du Québec ont financé conjointement.

SOMMAIRE

INTRODUCTION

Pour être en mesure de répondre aux besoins du marché nord-américain, la Division du transport en commun de Bombardier, avec le support des gouvernements du Québec et du Canada, a décidé de lancer un projet de développement de bogie destiné au transport interurbain et de banlieue.

Le projet est divisé en deux phases et a pour principaux objectifs de:

- développer un modèle de bogie pouvant servir au transport interurbain et de banlieue;
- concevoir un bogie performant, fiable et d'entretien facile;
- accroître le potentiel d'exportation des produits québécois.

La phase I du projet a pour objet l'étude de faisabilité tandis que la phase II comprendra les activités de conception, de fabrication et d'essais des prototypes.

Ce sommaire fait état des conclusions des études effectuées en phase I.

EXAMEN DES MODÈLES EXISTANTS

Au cours des dernières années, nous avons visité plusieurs ateliers d'entretien et de fabrication de bogies. Certains points importants de la conception d'un bogie, comme la facilité d'entretien et les bonnes pratiques de conception des assemblages mécano-soudés, ont été étudiés lors de ces visites.

De plus, une étude des bogies haute vitesse actuellement en usage dans le monde a été faite permettant ainsi d'évaluer les différents modèles de bogies utilisés en Amérique du Nord, en Europe et au Japon.

SIMULATIONS DE PARCOURS

Dans le but d'évaluer le gain de temps attribuable à l'utilisation du système d'inclinaison, une étude paramétrique a été effectuée. Un modèle mathématique simulant les conditions de certains parcours a servi à réaliser cette étude.

L'étude a démontré que l'utilisation du système d'inclinaison permettrait des économies de temps appréciables et par conséquent qu'il faut développer un bogie qui pourra être équipé d'un système d'inclinaison.

EXIGENCES ET OBJECTIFS DE CONCEPTION

Le bogie de type mécano-soudé sera conçu pour le transport interurbain et adaptable au transport de banlieue.

Les éléments des suspensions primaire et secondaire seront choisis de façon à assurer une manoeuvre stable, sécuritaire et confortable sans exercer de forces excessives sur les rails.

La vitesse maximale du véhicule sera de 200 km/h pour le transport interurbain et de 160 km/h pour le transport de banlieue.

ÉTUDE ET DÉFINITION DE LA CONFIGURATION DU BOGIE

Pour faire suite à l'étude comparative des bogies haute vitesse, on a établi la configuration générale du bogie en tenant compte des objectifs de conception. Le bogie sera du type mécano-soudé à roulements extérieurs avec un empattement de 2,642 m et des roues de 914 mm de diamètre.

La liaison caisse/bogie sera du type "pivot central" tandis que la liaison essieu/bogie sera assurée par des bielles. La suspension primaire verticale sera à ressorts et la suspension secondaire pourra être, selon les besoins, à ressorts ou pneumatique.

Le freinage sera effectué par des disques et/ou des sabots.

DESCRIPTION DU BOGIE

L'étude des caractéristiques vise à concevoir un bogie performant, polyvalent et d'entretien facile. Le bogie proposé sera muni d'un châssis et de suspensions typiques aux bogies haute vitesse. Les étages des suspensions ont été conçus pour assurer un maximum de confort. Le bogie destiné au transport interurbain sera équipé au besoin d'un système d'inclinaison. Les dessins préliminaires du bogie destiné au transport interurbain (avec système d'inclinaison) et celui du bogie destiné au transport de banlieue sont présentés à la section 6 du rapport.

ÉTUDE DES SUSPENSIONS

Après avoir revu les différents modèles de suspensions des bogies pour le transport interurbain ou de banlieue, des analyses préliminaires ont été effectuées pour vérifier si les éléments choisis rempliront bien leurs fonctions tant en régime statique qu'en régime dynamique. Ces analyses ont permis de vérifier si les suspensions pourront:

- manoeuvrer à l'intérieur des gabarits de voies dans des conditions extrêmes;
- prévenir le renversement de la voiture;
- prévenir le déchargement des roues et le déraillement;
- assurer un guidage stable tant en ligne droite qu'en courbe;
- filtrer les défauts de voie afin d'assurer un maximum de confort aux passagers;
- réduire les efforts roue/rail (usure) en courbe.

Les résultats de ces analyses montrent qu'avec la configuration de bogie choisie, il est possible d'ajuster les paramètres des éléments de suspension de manière à répondre aux exigences déjà posées.

ANALYSE DE STRUCTURE

Les études effectuées en phase I traitent principalement des critères de design, de l'examen de certains aciers pour le châssis du bogie et des analyses structurales préliminaires du châssis du bogie.

Les analyses ont été faites pour vérifier si la géométrie des principaux composants structuraux du bogie est correcte afin de pouvoir poursuivre la conception.

L'examen des résultats a permis d'identifier les sections où les contraintes sont les plus significatives soient:

- les traverses du châssis;
- l'interface traverse/longeron.

Les résultats des analyses démontrent que le concept du châssis du bogie mécano-soudé est adéquat sur le plan structural.

ÉTUDE DU SYSTÈME D'INCLINAISON

Les travaux préliminaires concernant l'analyse de la cinématique du système ont servi à:

- déterminer le degré de stabilité du système, soit sa tendance à revenir en position centrale après une panne;

- calculer les débattements de la caisse;

- dimensionner les cylindres d'inclinaison;

- dériver les pressions hydrauliques maximales nécessaires à l'opération du système.

Un modèle mathématique a aussi été utilisé pour prédire la réponse du système en fonction de la fréquence.

Les analyses et travaux faits en phase I permettent de garantir que la nouvelle cinématique du système d'inclinaison est conforme aux exigences déjà établies.

INTÉGRATION DU BOGIE À UNE CAISSE LRC

Les travaux effectués pour intégrer le bogie à une caisse de type LRC ont démontré qu'il fallait agrandir l'espace réservé au bogie de même que modifier les points d'attaches du bogie à la caisse. Les principales modifications à apporter consistent à varier la hauteur du plancher, à renforcer la traverse de charge, à revoir le dégagement des brancards ainsi qu'à déplacer la tuyauterie.

AUTRES ASPECTS

Dans le but de simplifier au maximum l'entretien du bogie, une attention particulière a été portée aux quatre sous-ensembles nécessitant le plus d'heures d'entretien. Ces sous-ensembles sont la liaison essieu/châssis, la liaison caisse/bogie et les suspensions primaire et secondaire.

L'ensemble du concept a été pensé de manière à obtenir un poids total minimum qui, selon les premières estimations, serait comparable au poids des bogies haute vitesse déjà étudiés.

Enfin, les conditions d'opération plus difficiles rencontrées au Canada ont aussi été prises en considération et ce, dès le début de l'étude conceptuelle.

CONCLUSION

L'étude de faisabilité a démontré qu'il est possible de développer un concept de bogie répondant aux exigences de performances, de fiabilité et de facilité d'entretien. Ce bogie sera conçu pour le transport interurbain et sera adaptable à une utilisation en banlieue. Après avoir pris connaissance des conclusions de l'étude, la Division du transport en commun de Bombardier propose de poursuivre la réalisation du projet.

TABLE DES MATIÈRES

SOMMAIRE ix
TABLE DES MATIÈRES xv
LISTE DES FIGURES xxi
LISTE DES TABLEAUX xxiii

SECTION 1 - INTRODUCTION

1.1 Contexte actuel 1

1.2 Nature du projet 2

1.3 Cheminement suivi en Phase I 4

1.4 Approche 5

1.5 Organigramme (Phase I) 6

SECTION 2 - EXAMEN DES BOGIES EXISTANTS

2.1 Visite de fabricants de bogies 7

2.2 Étude des bogies haute vitesse
2.2.1 Introduction 7
2.2.2 Résumé des caractéristiques des bogies évalués 8

SECTION 3 - ÉVALUATION DE L'EFFET DU SYSTÈME D'INCLINAISON SUR LA RÉDUCTION DU TEMPS DE PARCOURS

3.1 Introduction.....13

3.2 Méthode utilisée pour la simulation
3.2.1 Introduction 13
3.2.2 Opération (méthodologie) 14

3.3 Description des circuits 15

3.4 Résultats 19

SECTION 4 - OBJECTIFS DE CONCEPTION ET EXIGENCES GÉNÉRALES

4.1 Objectifs de conception 23

4.2 Exigences générales 24

SECTION 5 - ÉTUDE ET DÉFINITION DU BOGIE

5.1 Définition de la configuration du bogie....29
5.1.1 Effets sur les performances 29
5.1.2 Effets sur l'inspection et l'entretien 30

5.2 Définition de la configuration de la suspension primaire 31

5.3 Définition de la configuration de la liaison caisse/bogie 34

5.4 Définition de la configuration de la suspension secondaire 38

5.5 Étude de la mécanique du système d'inclinaison 39
5.5.1 Arrangement avec roulements linéaires 40
5.5.2 Arrangement avec surfaces anti-friction 42
5.5.3 Arrangement avec roulettes 43
5.5.4 Arrangement avec bielles 44

SECTION 6 - DESCRIPTION DU BOGIE

6.1 Introduction 47

6.2 Châssis 50

6.3 Traverse du système d'inclinaison 51

6.4 Roulement 52

6.5 Roue 53

6.6 Suspension primaire 53

6.7 Suspension secondaire 54

6.8 Freinage 55

6.9 Liaison caisse/bogie 55

6.10 Système d'inclinaison 56

6.11 Maquette 56

SECTION 7 - ÉTUDE DES SUSPENSIONS

7.1 Buts 59

7.2 Caractéristiques des suspensions
7.2.1 Suspension primaire 60
7.2.2 Suspension secondaire 62
7.2.3 Liaison caisse/bogie 64

7.3 Performances du bogie
7.3.1 Gabarits 66
7.3.2 Contrôle du roulis 68
7.3.3 Renversement de la voiture 72

7.3.4 Déchargement et déraillement 74
A) Déchargement des roues 75
B) Résistance à la rotation du bogie 75
C) Rapport L/V en courbe 76
7.3.5 Stabilité latérale 79
7.3.6 Confort 80
A) Facteurs déterminants dans le confort d'un véhicule 82
B) Évaluation du confort 86

SECTION 8 - ANALYSE DE STRUCTURE

8.1 Introduction 91

8.2 Critères de design 91

8.3 Choix des matériaux 92

8.4 Analyse du châssis
8.4.1 But 94
8.4.2 Méthode d'analyse 94
8.4.3 Modèle global 95
8.4.4 Modèle détaillé 96
8.4.5 Chargement du châssis 97
8.4.6 Résumé des résultats 101

SECTION 9 - ÉTUDE DU SYSTÈME D'INCLINAISON

9.1 Introduction 103

9.2 Analyse de la cinématique du système 103
9.2.1 Stabilité du système 104
9.2.2 Étude de la puissance hydraulique requise 105

9.3 Analyse de la réponse du système 105
9.3.1 Revue du modèle mathématique.....107

SECTION 10 - INTÉGRATION DU BOGIE À UNE CAISSE LRC

10.1 Introduction 109

10.2 Paramètres considérés pour l'étude d'interface 109

10.3 Modifications à apporter 110

SECTION 11 - AUTRES ASPECTS

11.1 Poids 113

11.2 Facilité d'entretien 115
11.2.1 Liaison caisse/bogie 115
11.2.2 Liaison essieu/châssis 115
11.2.3 Suspensions primaire et secondaire 116

11.3 Fiabilité 116

SECTION 12 - CONCLUSION 117

BIBLIOGRAPHIE 119

LISTE DES FIGURES

SECTION 3 - SIMULATIONS DE PARCOURS

3.1 Caractéristiques des corridors étudiés 17
3.2 Simulations de parcours 21

SECTION 5 - ÉTUDE ET DÉFINITION DES CONCEPTS

5.1 Configurations de suspensions primaires ...33
5.2 Liaisons caisse/bogie 35
5.3 Arrangement bielles/manivelles 40
5.4 Arrangement avec roulements linéaires.....41
5.5 Arrangement avec surfaces anti-friction 42
5.6 Arrangement avec roulettes 43
5.7 Arrangement avec bielles 44

SECTION 6 - DESCRIPTION DU BOGIE

6.1 Bogie pour le transport interurbain avec système d'inclinaison 48
6.2 Bogie pour le transport en banlieue 49
6.3 Châssis 50
6.4 Roulement 52

SECTION 7 - ANALYSE DES SUSPENSIONS

7.1 Suspension primaire 61
7.2 Élément de suspension 61
7.3 Modes de vibration 63
7.4 Gabarits caisse 67
7.5 Gabarits bogie 69
7.6 Coefficient de souplesse 71
7.7 Insuffisance des dévers en fonction du déchargement des roues 73
7.8 Forces L/V selon le critère de Nadal 78
7.9 Courbes iso-vitesses critiques 81

7.10 Modèle masses-ressorts-amortisseurs du corps humain 84
7.11 Spectre d'accélération verticale en milieu de caisse AWO 90
7.12 Spectre d'accélération verticale en milieu de caisse AW3 90

SECTION 8 - ANALYSE DE STRUCTURE

8.1 Modèle global: ensemble essieux/châssis ...95
8.2 Modèle global 95
8.3 Modèle détaillé 96
8.4 Chargement vertical 98
8.5 Chargement latéral 99
8.6 Chargement longitudinal 99
8.7 Charge de freinage 100

SECTION 9 - SYSTÈME D'INCLINAISON

9.1 Trajet du centre de gravité de la caisse 104
9.2 Trajet du signal dans le système d'inclinaison 106

SECTION 10 - INTÉGRATION DU BOGIE À UNE CAISSE LRC

10.1 Dégagements caisse/bogie 111

LISTE DES TABLEAUX

SECTION 3 - SIMULATIONS DE PARCOURS

3-1 Caractéristiques des corridors étudiés 16
3-2 Vitesses maximales en courbe 18

SECTION 4 - OBJECTIFS DE CONCEPTION ET EXIGENCES GÉNÉRALES

4-1 Conditions d'opération 27

SECTION 7 - ANALYSE DES SUSPENSIONS

7-1 Paramètres des suspensions 65
7-2 Valeurs Kauffman 76
7-3 Fréquences naturelles (Hz) 87

SECTION 8 - ANALYSE DE STRUCTURE

8-1 Critères de chargement 92

SECTION 11 - AUTRES ASPECTS

11-1 Poids 114

SECTION 1

INTRODUCTION

1.1 CONTEXTE ACTUEL

Les exigences concernant le transport sur rails des voyageurs sont de plus en plus grandes, qu'il s'agisse du confort des passagers ou de la capacité d'atteindre des vitesses nettement plus élevées que celles qui étaient pratiquées il y a encore quelques années.

Les trains européens et japonais atteignent fréquemment la vitesse de 200 km/h. En France, la S.N.C.F. opère avec succès, depuis le début des années 80, les TGV à des vitesses maximales de 260 km/h.

Au Canada et aux États-Unis, le contexte du transport interurbain sur rails des voyageurs est fort différent. Les plus faibles bassins de population et les plus grandes distances à parcourir ont, durant les deux dernières décennies, défavorisé le transport sur rails au profit du transport aérien. Toutefois, l'augmentation de l'achalandage des dernières années montre qu'il y a une clientèle intéressée à utiliser les transports ferroviaires si les temps de parcours sont raisonnables.

Note: Présentement dans le corridor Washington/New York, AMTRAK opère des trains circulant à une vitesse maximale de 190 km/h.

Même si, présentement, des vitesses de 150-160 km/h sont fréquemment atteintes, on parle de plus en plus de corridors haute vitesse dans lesquels roulerait du matériel confortable et performant. Il est donc à prévoir que d'ici les années 2000 on verra apparaître d'autres corridors où des vitesses de 200 km/h seront courantes.

Pour être capable de répondre aux besoins des futurs corridors haute vitesse en Amérique du Nord, il faut reconsidérer les principes ayant servi à concevoir les bogies nord-américains actuellement en usage. Ces futurs bogies devront fournir un meilleur confort, être plus légers, plus stables, fiables et faciles d'entretien.

Ainsi, pour être en mesure de fournir un bogie satisfaisant aux exigences de ces futures applications, la Division du transport en commun de Bombardier, avec le support des gouvernements du Québec et du Canada, a décidé de lancer un projet de développement de bogie destiné au transport interurbain et de banlieue.

1.2 NATURE DU PROJET

Le projet, d'une durée totale de 48 mois, se divise en deux phases. La phase I, qui est l'objet du présent rapport, traite essentiellement et exclusivement de l'étude de faisabilité.

Voici les principaux objectifs du projet:

- développer un concept de bogie pouvant, selon les besoins et après des modifications mineures, servir pour le transport interurbain (vitesses pouvant atteindre 225 km/h) et aussi pour le transport de banlieue;

- concevoir un bogie performant, robuste et facile à entretenir pour répondre adéquatement aux besoins futurs du marché nord-américain;

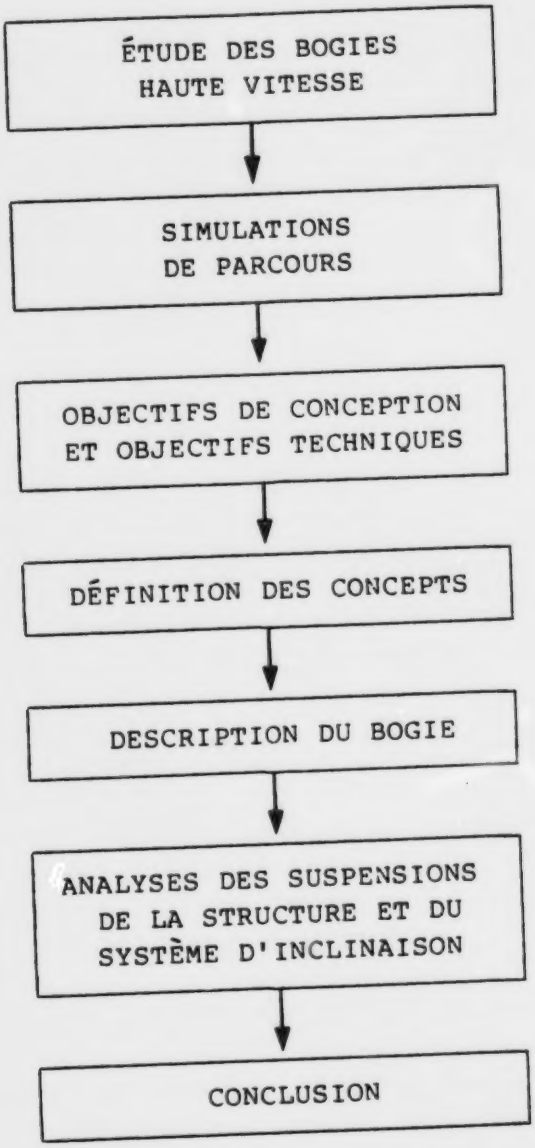
- accroître le potentiel d'exportation des produits québécois.

Le défi est donc d'arriver à concurrencer avantageusement les bogies européens et/ou japonais en atteignant les objectifs ci-haut mentionnés tout en conservant les qualités de fiabilité et de facilité d'entretien des bogies actuellement utilisés en Amérique.

Notes: - La phase I du projet, d'une durée de 9 mois, inclut l'étude de faisabilité tandis que la phase II, d'une durée de 39 mois, inclura les activités de conception, de fabrication, d'assemblage et d'essais des prototypes.

- Les analyses et les dessins contenus dans ce rapport sont préliminaires et seront révisés en phase II.

1.3 CHEMINEMENT SUIVI EN PHASE I



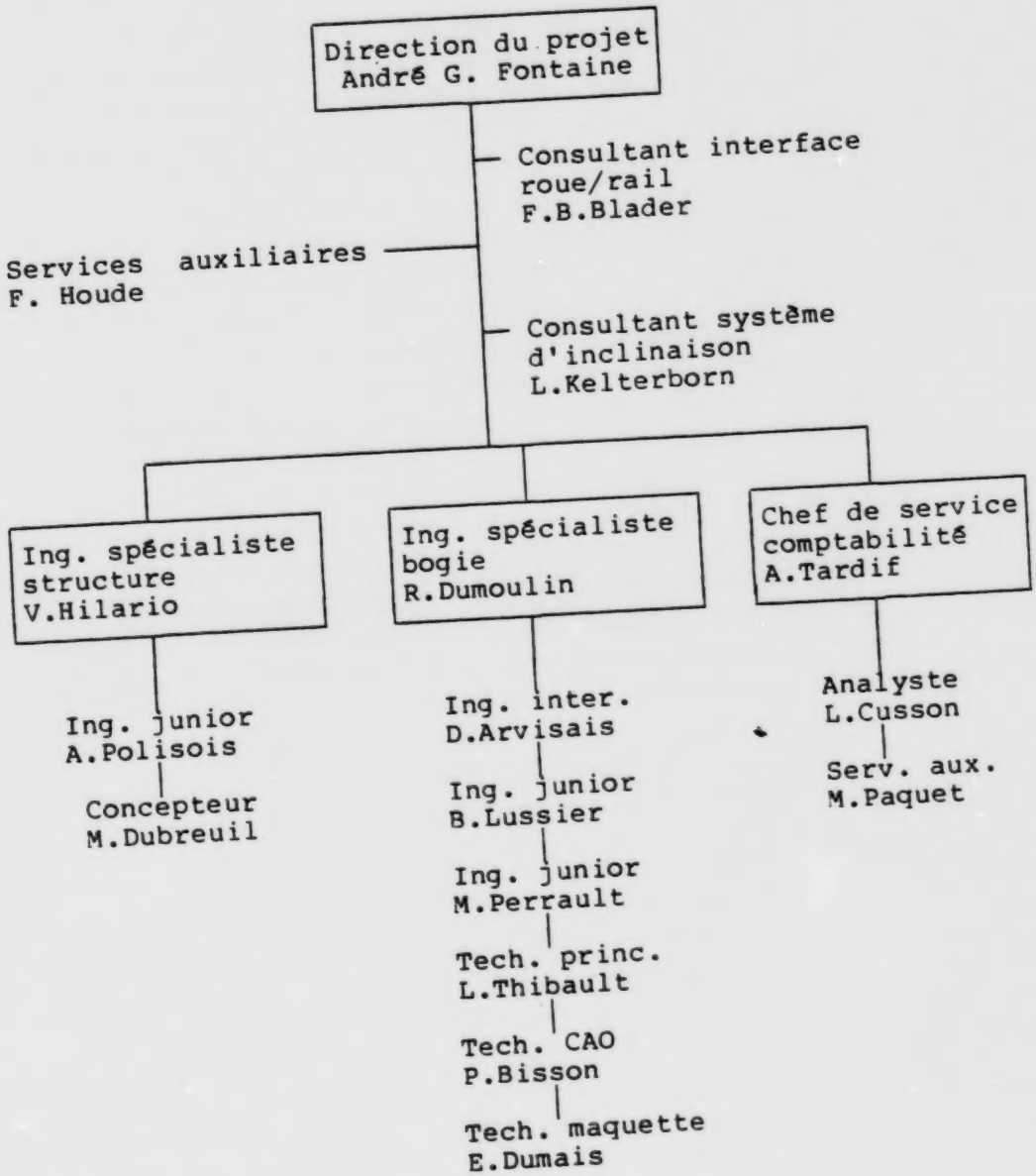
1.4 APPROCHE

La réalisation d'un tel projet nécessite, dès le départ, l'avis d'experts. Ainsi, pour nous assurer de l'adaptation optimale aux applications prévues, nous avons consulté le personnel d'entretien et d'opération de VIA Rail.

De plus, pour être en mesure d'égaler et même de surpasser les performances offertes par les bogies européens et/ou japonais, nous avons étudié à fond les paramètres d'une douzaine de ces bogies. Les principaux paramètres étudiés incluent les suspensions, la facilité d'entretien et l'arrangement général du bogie.

En ce qui concerne les analyses dynamiques et la conception du système d'inclinaison, nous avons fait appel à des consultants spécialisés dans ces domaines de manière à obtenir le plus rapidement possible des commentaires et des recommandations à mesure que nous progressions dans l'étude.

1.5 ORGANIGRAMME (Phase I)



SECTION 2

EXAMEN DES BOGIES EXISTANTS

2.1 VISITE DE FABRICANTS DE BOGIES

Ces dernières années, et plus particulièrement au début de la phase I du projet, plusieurs visites d'ateliers d'entretien et de fabrication de bogies ont permis d'étudier certains points importants qui doivent être considérés lors de la conception d'un bogie, spécialement la facilité d'entretien et les bonnes pratiques de conception des assemblages mécano-soudés.

En plus des informations générales rassemblées au cours de ces visites, nous avons fait une étude des bogies haute vitesse actuellement en usage dans le monde et plus particulièrement en Europe, en Amérique du Nord et au Japon. La présente section résume les points importants de cette étude.

Note: - Cette section est strictement un résumé des données qui ont été rassemblées dans le but de mieux identifier les caractéristiques importantes des divers bogies. Elle ne décrit pas le bogie qui a été conçu durant la phase I du présent projet.

2.2 ÉTUDE DES BOGIES HAUTE VITESSE

2.2.1 Introduction

Cette section vise à mettre en évidence les grandes lignes caractérisant les bogies destinés au transport à haute vitesse. Les données fournies proviennent en majeure partie d'une étude effectuée en 1978 pour le F.R.A. (Federal Railroad Administration). Tous les bogies étudiés dans ce rapport ont été conçus pour des vitesses de 200 km/h ou plus.

Le tableau suivant classifie, par pays, les bogies étudiés ainsi que les voitures sur lesquelles ils sont installés.

PAYS	VOITURES	BOGIES	CARACTÉRISTIQUES
Canada	LRC	LRC Dofasco	Système d'inclinaison
France	TGV Corail Turbo-train	Y-226 Y-32 Y-224	Bogie moteur
U.S.A.	Amcoach Metroliner	P-III GSI	Bogie articulé Bogie moteur
Japon	Shinkansen	DT-200	Bogie moteur
Angleterre	H.S.T.	BT-10	
Allemagne	G.M.Coach	Minden Deutz	
Russie	ER-200	ER-200	Bogie moteur
Italie	Eurofima	Y-270S	
Suisse	Metroliner	SIG	Bogie moteur

2.2.2 Résumé des caractéristiques des bogies évalués

Le but de cette section est de discuter des diverses caractéristiques de ces bogies.

Ces caractéristiques sont:

- la configuration du châssis;
- l'empattement du bogie;
- le diamètre de roue;
- les propriétés mécaniques des éléments des suspensions primaire et secondaire;

- la rigidité en roulis;
- le mécanisme de liaison du bogie à la caisse;
- la résistance à la rotation;
- le freinage;
- la masse non-suspendue;
- la masse suspendue.

Les résultats de cette étude ont permis d'identifier les caractéristiques adéquates à un bogie destiné au transport à haute vitesse.

Châssis : 10/12 sont à roulements extérieurs et 10/12 sont mécano-soudés.

L'utilisation de châssis à roulements extérieurs offre des avantages importants du point de vue de la performance. Cet arrangement est certainement celui qui est le plus approprié pour le contrôle de la stabilité, la tenue en roulis et une syntonisation optimale des fréquences.

La technologie "mécano-soudée" permet de réduire le poids et évite au constructeur du bogie d'avoir à travailler obligatoirement à partir d'une fonderie pour obtenir les éléments structuraux du bogie (châssis et traverse).

Empattement : L'empattement du bogie a peu d'effet sur la stabilité à haute vitesse comparativement aux paramètres de guidage des boîtes de roulements et aux dispositifs

anti-lacet. Les valeurs se situant entre 2,54 m et 2,66 m sont les plus utilisées.

Diamètre de roue : Dans 11 cas sur 12, des roues d'environ 914 mm de diamètre sont utilisées. La roue de plus grand diamètre s'use moins vite car, pour une même vitesse, elle réduit le nombre de rotations des organes de roulement. La roue de 914 mm de diamètre supporte mieux les charges et résiste mieux en général aux contraintes thermiques engendrées par les freins à sabots.

Suspension primaire : À l'exception du LRC et du bogie P-III, tous les bogies étudiés ont des ressorts hélicoïdaux comme suspension primaire verticale. Le ressort hélicoïdal est le plus utilisé surtout parce qu'il ne s'affaisse pas comme le caoutchouc sous une charge constante. Il est aussi facile à fabriquer, peu coûteux et fiable. Le guidage des boîtes de roulements s'effectue de diverses manières comme nous le verrons à la section 5.

Suspension secondaire : Les suspensions pneumatiques sont tout aussi utilisées que les suspensions à ressorts hélicoïdaux. Il faut toutefois considérer que, jusqu'au début des années 80 en Europe, l'utilisation des suspensions pneumatiques était presque uniquement réservée aux applications métro.

Elles sont plus coûteuses et demandent plus d'entretien que les suspensions à ressorts mais peuvent procurer un plus haut niveau de confort en plus de garder constante la hauteur du plancher de la voiture.

Barre anti-roulis : Quatre bogies sur douze utilisent ce dispositif pour augmenter la rigidité en roulis de la voiture. L'utilisation de ce dispositif permet l'emploi de suspensions secondaires plus souples donnant généralement un meilleur confort.

Liaison caisse / bogie : De tous les bogies étudiés, les bogies nord-américains (LRC, GSI, P-III) et le bogie russe (ER-200) sont les seuls à avoir une liaison par barres extérieures. Les autres bogies sont liés à la caisse par un pivot.

Restriction à la rotation : Tous les bogies évalués utilisent des dispositifs qui varient des plaques de friction installées entre le châssis et la traverse du bogie aux dispositifs anti-lacet modernes qui sont similaires aux amortisseurs hydrauliques horizontaux. Le bogie LRC utilise un dispositif télescopique fonctionnant par friction.

Freinage : Sur les douze bogies évalués, on retrouve quatre (4) modes de freinage soient: par sabots, par disques, par patins magnétiques et par freinage régénérateur (bogies motorisés seulement). Les modes de freinage par disques et par sabots demeurent ceux qui sont les plus fréquemment utilisés.

SECTION 3

ÉVALUATION DE L'EFFET DU SYSTÈME D'INCLINAISON SUR LA RÉDUCTION DU TEMPS DE PARCOURS

3.1 INTRODUCTION

Dans le but de mesurer le gain de temps attribuable à l'utilisation du système d'inclinaison sur différents corridors, une étude paramétrique a été effectuée. Cette étude a été faite à l'aide d'un modèle mathématique simulant les conditions rencontrées sur les parcours suivants: Montréal/Toronto, Séoul/Busan, Miami/Tampa et New York/Boston. Ces parcours ont été choisis parce qu'ils sont représentatifs des parcours types sur lesquels il est possible d'utiliser un train avec système d'inclinaison.

La présente section décrit la méthode utilisée pour obtenir, par simulations, les temps de parcours. Elle inclut aussi une description des parcours simulés ainsi que les résultats obtenus.

3.2 MÉTHODE UTILISÉE POUR LA SIMULATION

3.2.1 Introduction

Les simulations de parcours sont effectuées à l'aide d'un programme calculant les temps de parcours pour divers corridors sous diverses conditions.

Les informations nécessaires permettant d'opérer correctement le programme sont:

- la liste de tous les points où il y a changement d'altitude ou du profil vertical de la voie (pentes);
- la liste de tous les points où il y a changement de direction ou du profil horizontal de la voie, ceci incluant les courbes;

- la liste des surélévations et des rayons des courbes;
- la liste des restrictions de vitesse;
- la position exacte des stations et le temps d'arrêt à ces stations;
- la puissance disponible pour la traction en fonction de la vitesse;
- les taux de freinage;
- toute l'information concernant le train, c'est-à-dire le nombre de voitures, la masse des voitures et de la locomotive, la masse des passagers, etc.
- etc.

Les résultats de la simulation incluent essentiellement:

- le temps de parcours global;
- les temps de parcours de chacune des diverses sections;
- l'arrangement des segments pour effectuer les calculs;
- la vitesse maximale atteinte sur chacun des segments.

3.2.2 Opération (méthodologie)

Quand toutes les données d'entrées nécessaires aux calculs ont été lues et emmagasinées par l'ordinateur, le programme prépare les segments en fonction des données du tracé. Chaque fois qu'il y a un changement de profil de voie (horizontal et/ou vertical) ou de vitesse permise etc., un nouveau segment est créé. Ceci inclut évidemment les stations.

Les calculs sont effectués, un segment à la fois, en considérant la vitesse à la fin du segment précédent et en considérant le profil et les conditions d'opération du segment suivant de manière à pouvoir prédire s'il y aura

accélération, freinage ou vitesse constante. Il est à remarquer que ces trois (3) paramètres peuvent tous se rencontrer sur un même segment.

La force disponible pour accélérer est obtenue par la différence entre la puissance de traction disponible et la résistance à l'avancement à une vitesse donnée.

La vitesse maximale est atteinte lorsque la puissance disponible pour la traction égale la résistance à l'avancement.

Un algorithme permet aussi de prévoir la distance de freinage en fonction des limites de vitesse des segments précédant le train. Cet outil supplémentaire permet d'obtenir des résultats plus réalistes quelle que soit la longueur des segments parcourus.

3.3 DESCRIPTION DES CIRCUITS

L'étude paramétrique a été réalisée sur les corridors Montréal/Toronto, Séoul/Busan, Miami/Tampa et New-York/Boston. Ces quatre (4) corridors sont considérés comme étant représentatifs de l'ensemble des circuits potentiels pour utilisations interurbaines avec système d'inclinaison. La caractéristique la plus importante de ces corridors est la longueur équivalente de leurs courbes. C'est cette caractéristique qui les rend intéressants puisque parmi ces corridors, celui de Séoul/Busan a environ 31 % de sa longueur en courbe alors que celui de Miami/Tampa n'en a que 7 %.

Le tableau 3-1 et la figure 3.1 ci-dessous résument les principales caractéristiques des quatre (4) corridors étudiés.

TABLEAU 3-1

CARACTÉRISTIQUES DES CORRIDORS ÉTUDIÉS

	Montréal Toronto	Séoul Busan	Miami Tampa	New York Boston
Longueur (km)	537	444	409	368
Longueur des courbes (km)	86 (16 %)	137 (31 %)	29 (7 %)	106 (29 %)
Nombre de courbes en fonction du rayon de courbure 1°	105	-	19	38
2°	16	48	33	83
3°	3	112	9	45
4°	-	30	1	17
Rayon moyen des courbes (m)	1460	730	920	730
Longueur moyenne des courbes (km)	,7	,7	,5	,5

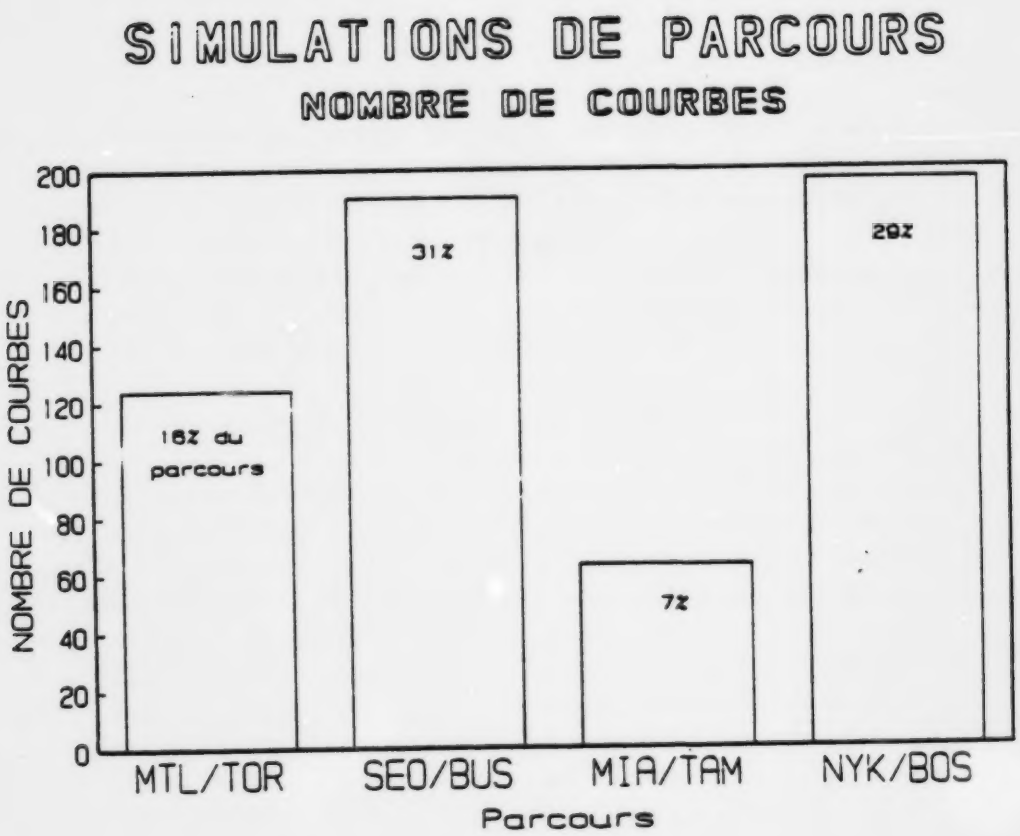


Figure 3.1

CARACTÉRISTIQUES DES CORRIDORS ÉTUDIÉS

En Amérique du Nord, l'insuffisance du dévers maximale permise est de 76 mm pour les trains conventionnels tandis que le LRC, avec son système d'inclinaison, peut opérer à 230 mm d'insuffisance du dévers. Ces valeurs sont basées sur la capacité du passager à supporter une accélération latérale n'excédant pas 1 m/s^2.

Pour fins d'étude, les vitesses maximales permises en courbe ont été calculées pour des trains conventionnels et pour des trains avec système d'inclinaison opérant à 230 mm d'insuffisance du dévers. Le tableau 3-2 donne les résultats de ces calculs.

TABLEAU 3-2

VITESSES MAXIMALES EN COURBE

Courbes (°) (m)	Dévers (mm)	Vitesse max.(km/h) Train conv.	Vitesse max.(km/h) Train avec s.incl.
1° 1750	75	147	209 (+42%)
	150	180	235 (+30%)
2° 875	75	104	148 (+42%)
	150	128	166 (+30%)
3° 583	75	85	121 (+42%)
	150	104	136 (+30%)

Ces résultats montrent que la vitesse moyenne d'opération peut être augmentée de façon importante sur un parcours avec courbes principalement à cause du profil de vitesse qui y est plus régulier.

3.4 RÉSULTATS

Les simulations ont permis, entre autres, de vérifier l'effet sur les temps de parcours des trois (3) paramètres suivants:

- l'augmentation de la vitesse en courbe telle que permise par l'utilisation optimale du système d'inclinaison;
- la vitesse maximale d'opération;
- la variation de la puissance massique.

Pour chacun des parcours analysés, on a utilisé un même train référence. La configuration de ce train référence est la suivante:

Locomctive	:	Modèle LRC 251/12+ avec 1715 kw max. au rail
Voiture	:	Voiture LRC
Configuration du train	:	1 locomotive - 4 voitures
Vitesse max.	:	153 km/h
Insuffisance du dévers max.	:	76 mm (sans système d'inclinaison)

Les résultats présentés à la figure 3.2 de la page 21 permettent de vérifier l'effet sur les temps de parcours des trois paramètres principaux qui sont: l'insuffisance du dévers, la vitesse maximale permise et la puissance massique. L'examen de la figure 3.2 montre que:

- Pour le corridor Montréal/Toronto, il est possible d'économiser 22 % du temps en combinant le système d'inclinaison à une vitesse maximale d'opération de 200 km/h. La simulation montre aussi que pour ce corridor, l'effet de l'augmentation de la puissance massique est faible.

- Les courbes du corridor Séoul/Busan sont tellement rapprochées que l'augmentation de la puissance massique ou de la limite de vitesse a très peu d'influence sur le gain de temps. Avec 31 % de sa longueur en courbes, ce parcours peut bénéficier avantageusement (15 % d'économie de temps) d'un système d'inclinaison sans avoir à augmenter les limites de vitesse.

- Le corridor Miami/Tampa a beaucoup moins de courbes. L'effet de l'augmentation de la puissance massique combinée au système d'inclinaison permettrait d'économiser jusqu'à 20 % du temps.

- Le corridor New York/Boston est un peu un mélange des deux premiers corridors étudiés. Le système d'inclinaison permet d'économiser 12 % du temps et lorsque combiné à une augmentation de vitesse maximale, il permet d'économiser environ 18 % du temps. Une augmentation de la puissance massique ajoutée aux deux autres conditions permet une économie maximale de 23 %.

L'étude a donc démontré que le système d'inclinaison permet des économies de temps appréciables et qu'il faut développer un bogie qui pourrait être muni d'un système d'inclinaison.

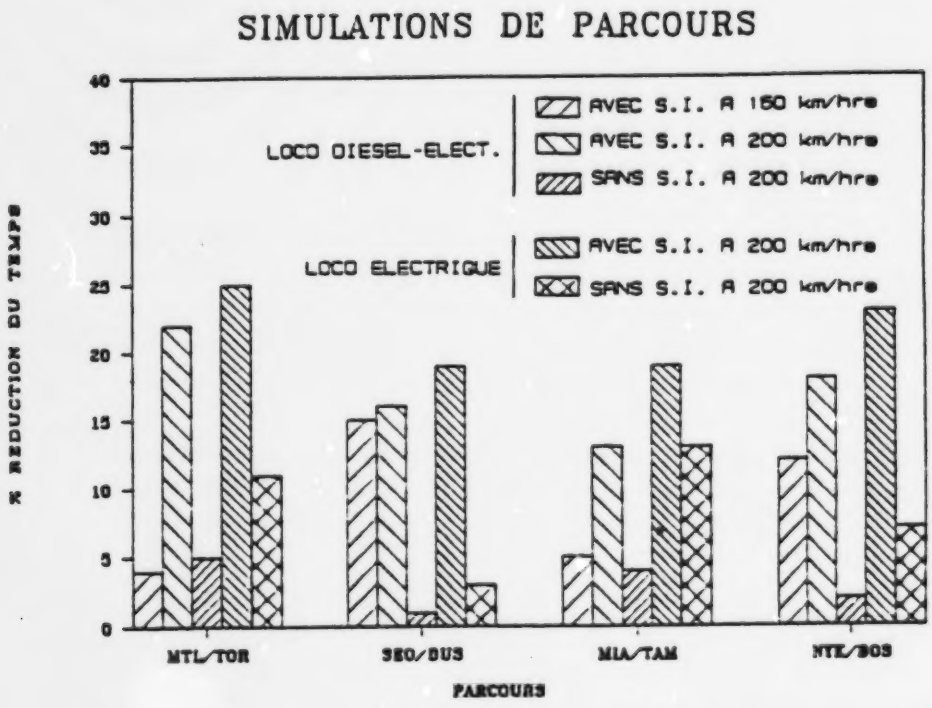


Figure 3.2

SIMULATIONS DE PARCOURS

SECTION 4

OBJECTIFS DE CONCEPTION ET EXIGENCES GÉNÉRALES

4.1 OBJECTIFS DE CONCEPTION

Le bogie sera conçu pour le transport interurbain et sera adaptable aux voitures de banlieue.

Le châssis sera constitué d'éléments mécano-soudés. Ce type de fabrication permet d'obtenir un châssis plus léger que le châssis coulé et évite aux constructeurs de bogies de dépendre d'une fonderie.

Les éléments des suspensions primaire et secondaire devront être conçus de façon à assurer une opération stable, sécuritaire et confortable sans exercer de forces excessives sur les rails à vitesse maximale et quels que soient les cas de chargement.

La conception générale du bogie sera faite en fonction de la facilité d'entretien. Une attention particulière sera portée aux points suivants:

- La séparation du bogie de la caisse devra s'effectuer en un minimum de temps et l'ajustement de la hauteur du plancher devra se faire aux points d'attache caisse/bogie. Ces deux opérations devront être réalisables sans l'utilisation de puits d'accès.

- La séparation de l'essieu du bogie s'effectuera sans avoir à démonter les éléments de suspension primaire et de freinage.

- Les pièces d'équipement suspendues au châssis du bogie devront être facilement accessibles et démontables évitant ainsi de devoir renverser le châssis du bogie.

- L'arrangement général du châssis devra être conçu de manière à ce qu'il y ait un minimum de modifications à faire pour convertir le bogie de la version interurbaine à la version banlieue.

4.2 EXIGENCES GÉNÉRALES

À partir des exigences habituelles des clients, un ensemble d'objectifs ont été posés afin de guider les étapes préliminaires de la conception. Ces objectifs sont brièvement présentés et commentés ci-après.

- Châssis et traverse

  Le châssis et la traverse du bogie seront conçus pour une vie minimale d'une durée de 30 ans sous des conditions d'opérations ferroviaires typiques à l'Amérique du Nord.

- Liaison caisse/bogie

  La liaison du bogie à la caisse devra être conçue pour résister à des efforts de cisaillement de 1112 KN (requis par la "Federal Railroad Administration") appliqués dans le plan horizontal.

- Roue

  La roue sera de type "multiple wear" et devra être conforme à la norme AAR. La forme de la toile devra minimiser le déjettement de la jante provenant de l'échauffement de la roue durant les freinages.

- Essieu

  Tel que requis par la norme AAR, pour les voitures et wagons ferroviaires, l'essieu sera fabriqué à partir d'acier au carbone et forgé.

- Roulement

Le roulement sera du type fermé et aura des joints d'étanchéité du type labyrinthe. L'entretien des roulements ne devrait s'effectuer que lors du remplacement d'un jeu de roues sur un essieu. La vie calculée du roulement sera de 1 600 000 km telle que définie par la norme ASA Standard B3.11-1959. La boîte de roulement sera munie d'attaches pour détecteurs de boîtes chaudes et capteur de vitesse.

- Éléments de suspensions primaire et secondaire

Les suspensions seront conçues pour opérer adéquatement sous les conditions de charge données au tableau 4-1, présenté à la fin de la section 4. Ils seront choisis en fonction des critères suivants:

- durée de vie;
- caractéristiques stables (peu de fluage);
- caractéristiques dynamiques similaires aux caractéristiques statiques;
- entretien minime;
- interférence minimale avec le plancher de la caisse (suspension secondaire).

Dans le cas du bris d'un ou de plusieurs éléments de suspension, l'arrangement devra permettre une opération sécuritaire de la voiture avec un niveau de confort vibratoire réduit.

La suspension primaire sera conçue de façon à ce que, lors d'un passage sur une portion de voie vrillée (32 mm sur 27 m), aucune roue ne soit déchargée de plus de 15 % afin d'éviter les déraillements sur de mauvaises voies.

Pour la version interurbaine, les efforts de freinage seront partagés entre les disques et les jantes des roues dans la proportion 75 % et 25 % respectivement.

- Mécanique du système d'inclinaison

La mécanique du système d'inclinaison devra être conforme aux objectifs suivants:

- la mécanique devra permettre une inclinaison de ± 7,5°;

- elle devra être conçue de façon à ce que l'usure des composants n'engendre pas de jeux permettant des impacts entre les pièces métalliques causant ainsi leur dégradation;

- la mécanique ne nécessitera un entretien que lors de la revue majeure du bogie, soit tous les cinq (5) ans.

TABLEAU 4-1

CONDITIONS D'OPÉRATION		
Classe des voies	Interurbain: Banlieue:	FRA classe 6 FRA classe 5
Vent latéral max.	85 km/h avec rafales à 140 km/h	
Vitesse maximale d'opération	Interurbain: Banlieue:	200 km/h 145 km/h
Surélévation max. de la voie		152 mm
Courbe minimum horizontale		76 m
Courbe minimum verticale		305 m
Gabarit de voie		1 435 mm
Insuffisance du dévers max.	Interurbain: Banlieue:	230 mm 75 mm

CONDITIONS DE CHARGE		
Poids d'une caisse vide (interurbain)	AW0:	34 tonnes
Poids d'une caisse prête pour le service mais sans passagers (interurbain)	AW1:	35 tonnes
Poids d'une caisse à pleine charge (interurbain)	AW2:	41 tonnes
Poids d'une caisse à pleine charge (banlieue)	AW3:	45 tonnes

SECTION 5

ÉTUDE ET DÉFINITION DU BOGIE

5.1 DÉFINITION DE LA CONFIGURATION DU BOGIE

À partir des objectifs de conception et des résultats de l'étude comparative des bogies haute vitesse, la configuration générale du bogie a été établie. Le bogie sera du type à roulements extérieurs avec un empattement de 2 642 mm et des roues de 914 mm de diamètre. La version du bogie pour voitures de banlieues aura des roues de 864 mm de diamètre.

La configuration choisie aura un certain impact sur les performances, la facilité d'entretien et sur les modifications à apporter à la caisse.

5.1.1 Effets sur les performances

- Stabilité

  Pour une même rigidité de suspension primaire longitudinale, un bogie à roulements externes a une rigidité en lacet d'essieu d'environ deux (2) fois supérieure à celle d'un bogie à roulements internes, et ce même en tenant compte de l'inertie supplémentaire de l'essieu. Ceci est principalement dû au fait que la rigidité en lacet est proportionnelle au carré de la demi-distance entre les suspensions primaires.

- Roulis

  L'utilisation d'un châssis à roulements externes permet, par l'augmentation de la distance entre les suspensions primaires, d'avoir un contrôle adéquat du roulis tout

en gardant une suspension suffisamment souple pour filtrer les défauts de voie et minimiser le déchargement des roues.

- Syntonisation des fréquences

Un bogie à roulements extérieurs permet l'utilisation d'une suspension primaire souple sans compromettre la tenue en roulis. Il en résulte un confort optimal puisque les fréquences des modes de pompage et de tangage du bogie peuvent être mieux découplées de la fréquence du mode de flexion verticale de la caisse.

- Performances en courbes

Pour des paramètres identiques des suspensions, la performance en courbe du bogie est moins bonne que celle du bogie à roulements intérieurs. Il convient cependant de souligner qu'un choix approprié du profil de bandage de roue et des paramètres des suspensions horizontales pourront compenser cet inconvénient.

5.1.2 Effets sur l'inspection et l'entretien

En plus d'avoir un effet déterminant sur les performances, la configuration générale du bogie a une influence sur la facilité d'entretien. Une revue des principaux points d'inspection et d'entretien permet d'apprécier l'importance du choix de la configuration à roulements extérieurs.

- Changement de l'essieu

Grâce à l'arrangement extérieur, les éléments reliant les essieux aux boîtes de roulement sont facilement accessibles et

peuvent être inspectés sans qu'un puits d'accès ne soit nécessaire.

- Inspection de la suspension primaire et de la boîte d'essieu

  L'inspection visuelle est nettement plus facile que dans le cas de l'arrangement à roulements intérieurs (sans puits d'accès).

- Détection des boîtes chaudes

  Pour une configuration à roulements intérieurs, la détection doit absolument s'effectuer à l'aide d'un système embarqué. L'arrangement extérieur permet l'utilisation de détecteurs infrarouges répartis le long de la voie, ce qui est très avantageux.

- Inspection et entretien des freins

  L'inspection des unités de freins à sabots est un peu plus difficile pour la configuration choisie. Afin de corriger cette situation, l'actuateur de freins à sabot devra être judicieusement placé (phase II).

5.2 DÉFINITION DE LA CONFIGURATION DE LA SUSPENSION PRIMAIRE

La configuration à bielles a été choisie après l'évaluation de deux (2) douzaines de configurations de liaisons essieu/châssis.

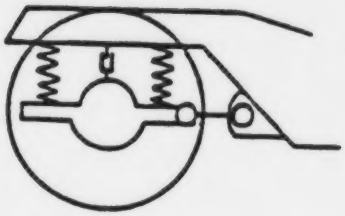
Les principaux critères ayant servi à l'évaluation sont:

- la facilité de démontage de l'essieu;
- un nombre minimum de composants;
- un encombrement minima;
- la stabilité des éléments;
- le contrôle des rigidités;
- la fiabilité de l'arrangement.

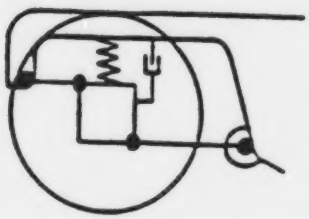
Ces critères ont été utilisés pour évaluer les configurations des suspensions primaires des bogies haute vitesse considérées comme satisfaisantes pour notre application. Ces bogies sont:

- le bogie du train HST;
- le bogie du train TGV;
- le bogie du train SHINKANSEN;
- le bogie MINDEN-DEUTZ;
- le bogie Y.32 de la voiture CORAIL.

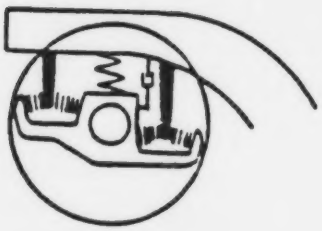
La figure 5.1 présente les schémas des différents arrangements de la liaison essieu/châssis de ces bogies.



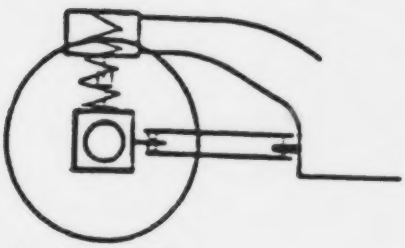
HST



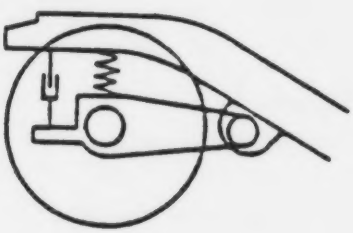
SHINKANSEN



TGV



MINDEN-DEUTZ



CORAIL

Figure 5.1

CONFIGURATIONS DE SUSPENSIONS PRIMAIRES

À la suite de l'évaluation des différentes configurations, le principe de la bielle a été retenu. Cette configuration permet un entretien facile, surtout parce que l'essieu peut être démonté sans que le ressort ne sorte de son enceinte. Elle donne un longeron court, ce qui réduit l'encombrement du bogie. De plus, le ressort hélicoïdal assure un comportement statique et dynamique pratiquement identique sans problème de fluage.

5.3 DÉFINITION DE LA CONFIGURATION DE LA LIAISON CAISSE/BOGIE

Quatorze (14) configurations différentes ont été identifiées pour les bogies actuellement en service à travers le monde.

De l'ensemble de ces arrangements, les trois (3) principaux ont été retenus et sont décrits aux pages suivantes (Figure 5.2).

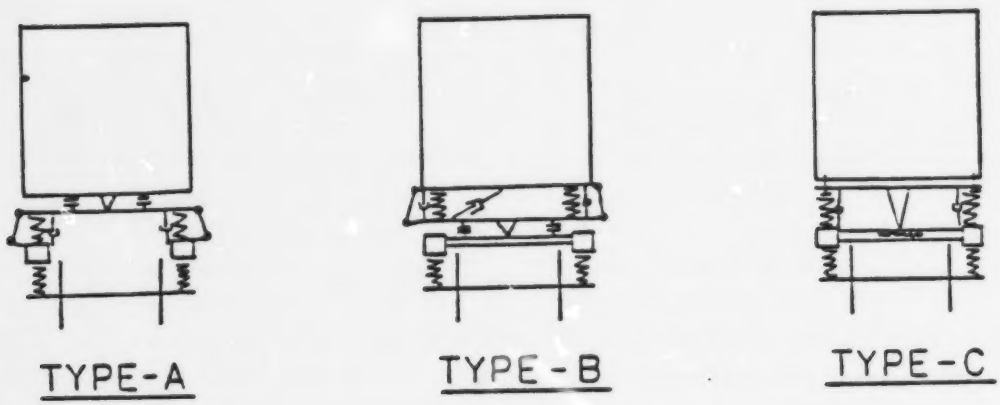


Figure 5.2

LIAISONS CAISSE/BOGIE

L'arrangement du type A est typique aux bogies classiques à palonniers tant pour les applications métro qu'interurbaines. Cet arrangement plutôt simple se compose d'un pivot attachant la caisse à une traverse de charge reposant sur la suspension secondaire. Les efforts longitudinaux sont transférés au châssis du bogie par des bielles de traction disposées parallèlement aux ressorts de la suspension secondaire.

Les principales caractéristiques de cet arrangement sont les suivantes:

- la traverse de charge fait partie de la masse de la caisse. Elle n'affecte donc pas la performance dynamique du bogie;
- la transmission des efforts longitudinaux entre le bogie et la caisse n'est pas optimale pour cet arrangement. Le point de transfert est généralement situé à la hauteur du longeron, donc trop haut;
- le découplage de la caisse doit être fait en déverrouillant le pivot central ce qui rend l'opération difficile.

Cette configuration date du début du siècle et ne satisfait pas à nos objectifs de conception. Elle n'a pas été retenue.

L'arrangement suivant (type B) est plus moderne et corrige certains défauts de l'arrangement du type A. Cet arrangement est populaire aux États-Unis; les voitures "commuter" de Pullman, les voitures "metroliner" et les voitures "Amfleet" ont des bogies utilisant cet arrangement.

Le principal avantage de cette configuration consiste à pouvoir ajuster la position verticale du point de traction afin de mieux filtrer les oscillations de tangage du bogie.

Ce déplacement a cependant des effets négatifs sur la facilité d'entretien et la performance dynamique du bogie. Le nombre d'éléments à détacher est passé de un (1) à cinq (5) pour cet arrangement par rapport à la configuration du type A. De plus, la masse de la traverse est additionnée à la masse suspendue du bogie. Cette augmentation de masse a normalement pour effet de diminuer légèrement le niveau de confort vertical de la voiture.

Cet arrangement n'a pu être retenu pour les raisons suivantes:

- les objectifs d'entretien ne sont pas atteints;
- la position de la traverse dans le bogie cause des incompatibilités géométriques importantes pour la version avec système d'inclinaison;
- la masse supplémentaire de la traverse de charge peut défavoriser le confort vertical de la voiture.

La dernière configuration présentée (type C) est celle qui a été retenue. De conception européenne, elle offre toutes les qualités recherchées pour une liaison caisse/bogie optimale.

L'arrangement général comprend une fausse traverse fixée en quatre (4) points à la caisse et en un point central au bogie. Le pivot central se situe à la hauteur des essieux.

Le pivot est relié à la traverse inclinable à l'aide d'un mécanisme à bielles. Ce mécanisme permet un débattement latéral sans restriction importante tout en procurant un lien adéquat pour la transmission des forces longitudinales.

L'avantage principal de cet arrangement est qu'il permet de découpler facilement la caisse du bogie en démontant un nombre minimum de points d'attaches facilement accessibles (quatre boulons). De plus, la masse de la fausse traverse fait partie de la caisse et, par conséquent, n'affecte pas la performance dynamique du bogie. Finalement, le réajustement de la hauteur du plancher de la caisse nécessaire pour compenser l'usure des roues peut s'effectuer entre la fausse traverse et la caisse.

L'inconvénient majeur de cette configuration est qu'il faut assurer de façon adéquate le transfert des forces longitudinales de traction et de collision du point d'ancrage (hauteur des essieux) jusqu'à la structure du sous-châssis de la caisse. Ceci nécessite une structure plus forte et par conséquent plus lourde.

5.4 DÉFINITION DE LA CONFIGURATION DE LA SUSPENSION SECONDAIRE

Afin d'être compatible avec l'arrangement choisi pour la liaison caisse/bogie, la suspension secondaire devra permettre au bogie de tourner par rapport à la caisse dans les courbes. Ceci implique que les éléments de la suspension secondaire devront être suffisamment flexibles pour permettre les déplacements en cisaillement nécessaires à la rotation du bogie.

Pour l'utilisation interurbaine, un ballon permettant un cisaillement de 125 mm tout en offrant les rigidités verticale et latérale adéquates a été retenu. La distance transversale entre les ballons sera, quant à elle, limitée à 1 830 mm, ce qui nécessitera l'utilisation d'une barre anti-roulis qui assurera une rigidité en roulis appropriée. Des amortisseurs hydrauliques seront utilisés en parallèle avec les ballons pneumatiques.

L'amortissement latéral ainsi que l'amortissement du mode de lacet du bogie seront fournis par des amortisseurs hydrauliques.

Dans la version pour voitures de banlieue, le ballon pourra être remplacé par un ressort hélicoïdal.

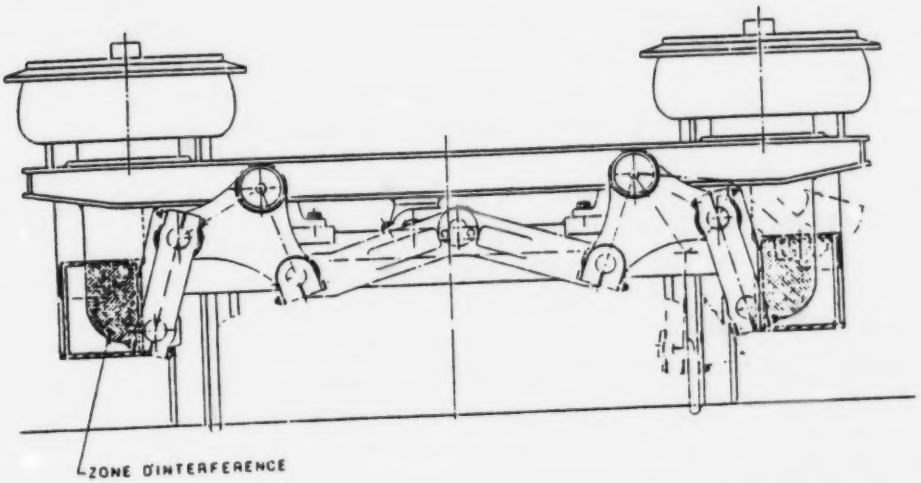
5.5 ÉTUDE DE LA MÉCANIQUE DU SYSTÈME D'INCLINAISON

L'évaluation des différentes options pour la mécanique du système d'inclinaison est terminée.

Les configurations qui ont été étudiées sont:

- un mécanisme à bielles et manivelles similaire au mécanisme du bogie LRC Dofasco;
- une configuration avec des roulements linéaires;
- une configuration avec des surfaces anti-friction;
- une configuration avec roulettes;
- une configuration avec bielles simples.

L'analyse de ces configurations poursuivait deux buts. Premièrement, il fallait obtenir un mécanisme simple pouvant être intégré au châssis du bogie. Deuxièmement, il fallait limiter le poids afin de minimiser son effet sur le comportement dynamique général du bogie. La figure 5.3 illustre l'arrangement LRC actuel de la mécanique bielles/manivelles superposée au châssis du bogie proposé. Cette mécanique, conçue initialement pour un bogie à roulements intérieurs, ne peut pas être intégrée à un bogie à longerons extérieurs. Les zones ombragées sur la figure 5.3 montrent l'interférence entre la traverse inclinable et les longerons en position nominale. À cause de l'incompatibilité géométrique et de la masse imposante de cet arrangement, cette configuration a été rejetée (voir page suivante).



MECANIQUE DU SYSTEME D'INCLINAISON
ARRANGEMENT AVEC BIELLES-MANIVELLES

Figure 5.3

ARRANGEMENT BIELLES/MANIVELLES

En se basant sur les objectifs de conception, les quatre (4) configurations suivantes ont été évaluées.

5.5.1 Arrangement avec roulements linéaires (Figure 5.4)

De conception relativement compacte et simple, les roulements linéaires sont grandement utilisés pour supporter de fortes charges en fléchissant peu.

Ils sont cependant conçus pour des rails rectilignes et l'application considérée exige des rails courbés.

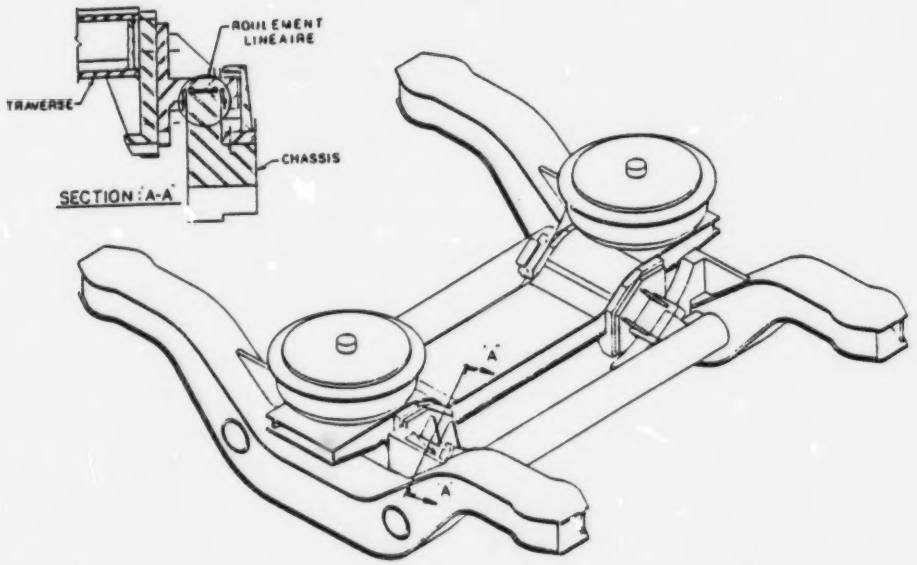


Figure 5.4 MÉCANIQUE DU SYSTÈME D'INCLINAISON
ARRANGEMENT AVEC ROULEMENT LINÉAIRE

ARRANGEMENT AVEC ROULEMENTS LINÉAIRES

Un seul fournisseur de roulements linéaires était prêt à développer un élément spécialement conçu pour notre application. Cependant, l'arrangement proposé ne répondait pas de façon satisfaisante aux objectifs de conception et aux conditions de chargement.

Les principaux critères auxquels on n'a pu répondre sont:

- l'impossibilité de prévenir les jeux dans l'assemblage advenant l'usure d'un des composants;
- l'impossibilité de garantir une opération sans entretien pour une période de cinq (5) ans;
- l'incapacité d'adaptation aux tolérances d'assemblage sur le bogie;
- le potentiel de marquage des billes et des surfaces de roulement lors d'une non-utilisation prolongée du système.

À cause de ces différentes raisons, cette alternative a été rejetée.

5.5.2 Arrangement avec surfaces anti-friction (Figure 5.5)

Afin de garder à leurs minimums les jeux causés par l'usure et afin de simplifier le montage (tolérances de fabrication), des coussins de caoutchouc ayant une surface recouverte de TEFLON ont été évalués.

La surface recouverte de TEFLON permet un transfert relativement uniforme de la charge tout en produisant un désalignement minime des composants. De plus, pour les charges et vitesses considérées, les fournisseurs semblent pouvoir garantir un service dit "sans entretien" pour autant que les surfaces soient bien protégées. Toutefois, d'après notre expérience dans les utilisations ferroviaires, il est pratiquement impossible de garantir une protection parfaite contre la contamination par la poussière qui résulte toujours d'une usure par abrasion.

Cette solution a donc été mise de côté.

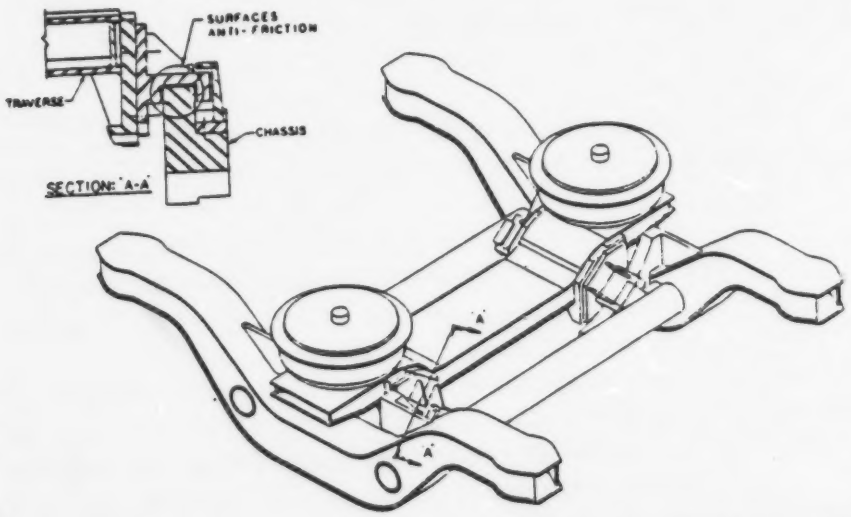


Figure 5.5 MECANIQUE DU SYSTEME D'INCLINAISON
ARRANGEMENT AVEC SURFACES ANTI-FRICTION

ARRANGEMENT AVEC SURFACES ANTI-FRICTION

5.5.3 Arrangement avec roulettes (Figure 5.6)

L'arrangement à roulettes est souvent utilisé pour les systèmes d'inclinaison de voitures. Il permet d'avoir une bonne flexibilité lors du montage tout en permettant un lien mécanique positif.

L'inconvénient majeur de cet arrangement est le potentiel de dégradation des surfaces métalliques en contact. Les contraintes hertziennes sur les composants, roulettes et surfaces de roulement étaient trop élevées pour les conditions de charges considérées. Cette solution a donc été rejetée.

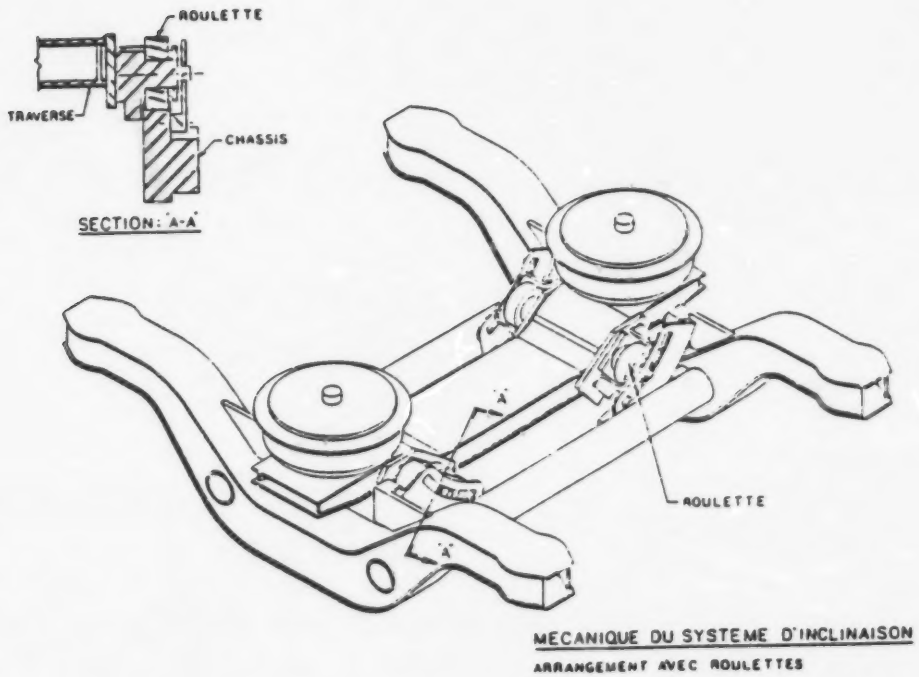


Figure 5.6

ARRANGEMENT AVEC ROULETTES

5.5.4 Arrangement avec bielles (Figure 5.7)

Cette configuration relativement simple répond aux objectifs de conception quant à l'usure, l'entretien, l'assemblage, la masse et le transfert des forces sur le châssis. Elle a donc été retenue.

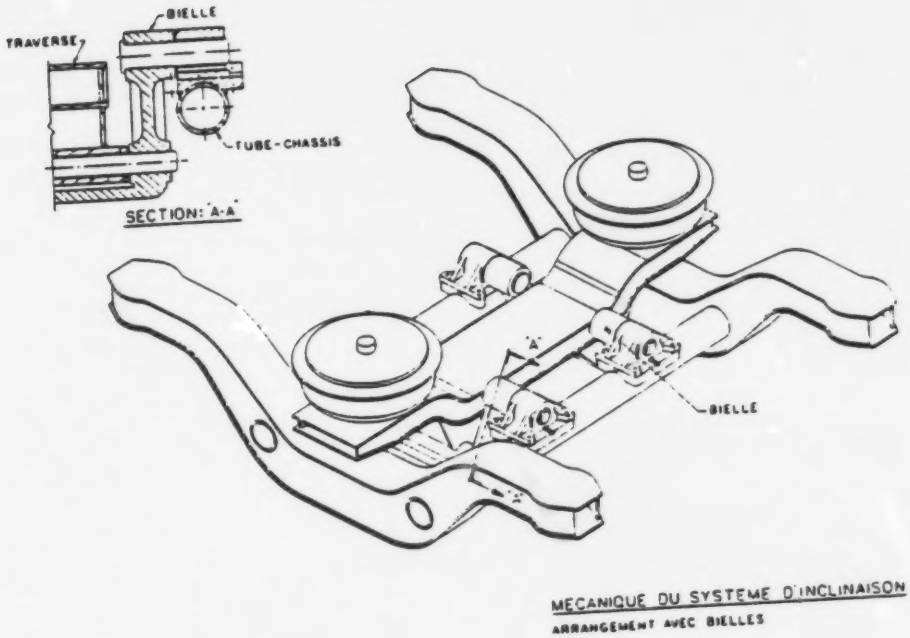


Figure 5.7

ARRANGEMENT AVEC BIELLES

Les résultats des études effectuées montrent que la configuration et la cinématique du système sont satisfaisantes. Il reste encore à analyser ou définir certains autres aspects tels que:

- la définition du système de rappel et de verrouillage en cas de panne;
- la revue de la compatibilité des composants de contrôle du système hydraulique (servo-valve);
- l'évaluation des caractéristiques de réponse en fréquence du système complet;
- l'évaluation de l'effet de la nouvelle cinématique sur le confort des passagers.

Ces points seront analysés au début de la phase II.

SECTION 6

DESCRIPTION DU BOGIE

6.1 INTRODUCTION

L'étude conceptuelle a été orientée vers la définition d'un bogie performant, polyvalent et facile d'entretien. Le bogie proposé a un empattement et une suspension primaire typiques aux bogies haute vitesse déjà en service. Les deux étages des suspensions sont conçus pour assurer un grand niveau de confort. Dans sa version pour utilisation interurbaine, le bogie pourra être équipé ou non d'un système d'inclinaison.

Les sections suivantes décrivent plus en détail chacun des sous-ensembles. Les dessins préliminaires de l'ensemble du bogie destiné au transport interurbain avec système d'inclinaison et au transport de banlieue sont présentés aux figures 6.1 et 6.2.

Figure 6.1

BOGIE POUR LE TRANSPORT INTERURBAIN
AVEC SYSTÈME D'INCLINAISON

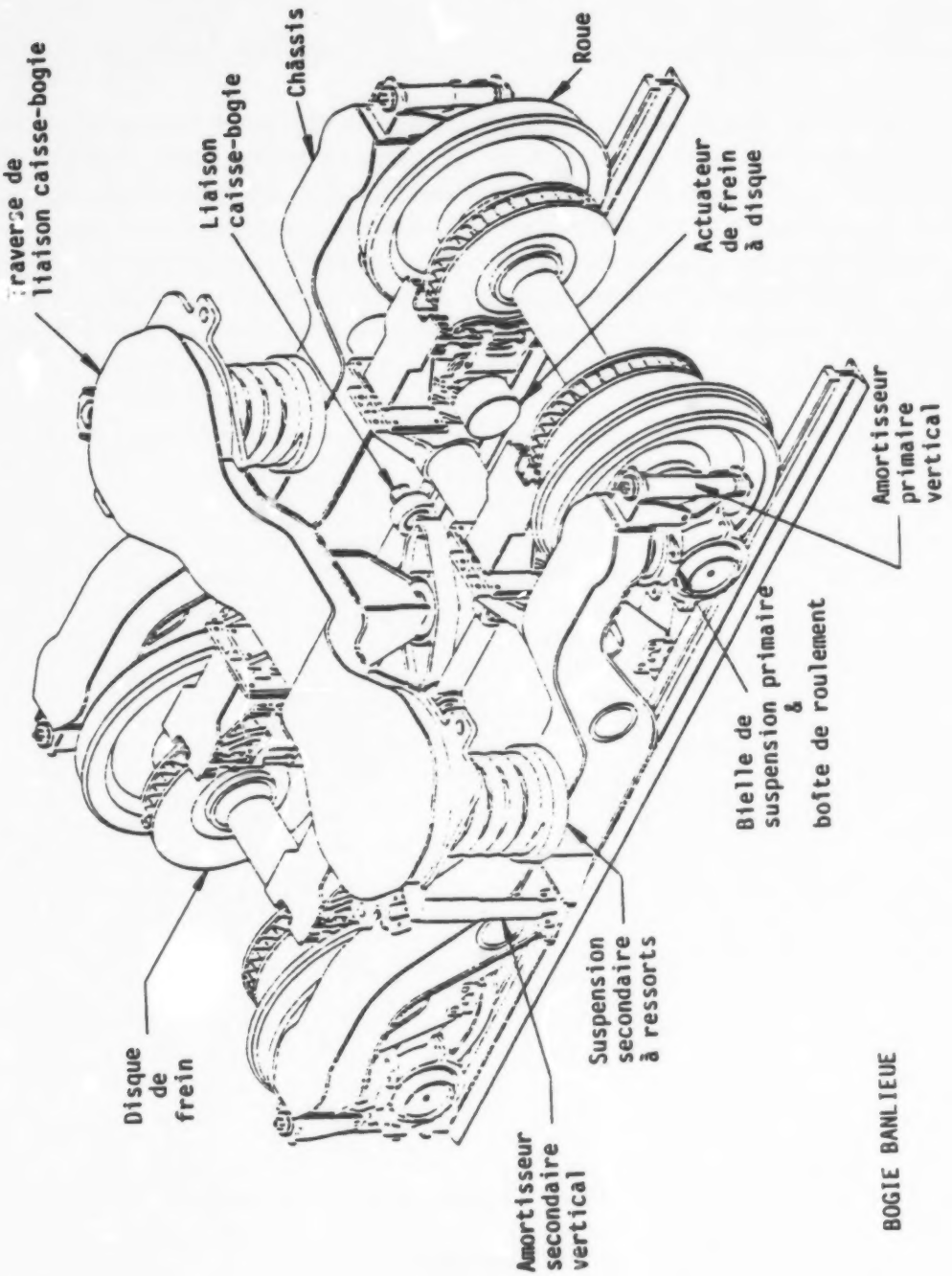


Figure 6.2

BOGIE POUR LE TRANSPORT EN BANLIEUE

6.2 CHÂSSIS

Le châssis du type mécano-soudé à roulements extérieurs est composé de deux longerons identiques faits de plaques coupées, pliées à chaud et soudées entre elles. Les longerons sont reliés par deux tubes qui servent aussi à supporter l'équipement de freinage à disques. Le châssis a été conçu pour servir aux deux (2) types d'applications (Figure 6.3).

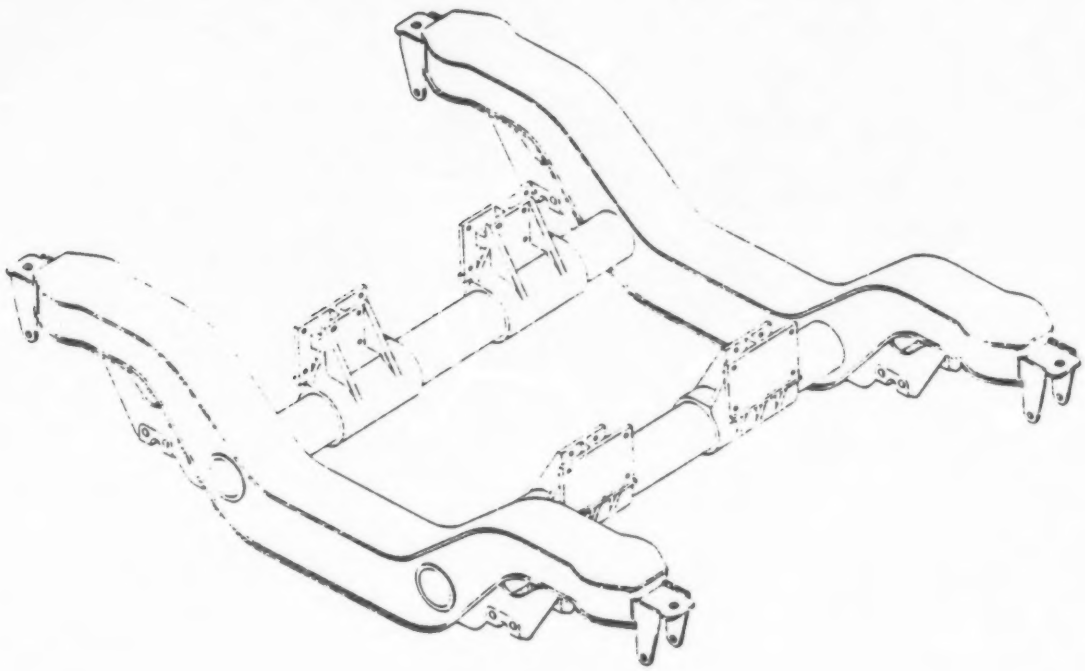


Figure 6.3

CHÂSSIS

6.3 TRAVERSE DU SYSTÈME D'INCLINAISON

La traverse, également de type mécano-soudé, supporte la caisse à ses extrémités par des ballons pneumatiques et est supportée à ses extrémités par les membrures du système d'inclinaison. Cet arrangement réduit les efforts de flexion dans la traverse et permet de réduire le poids de celle-ci. De plus, elle est conçue pour répondre aux normes FRA de charge de 1 112 KN en cas de collision.

Sur la traverse se trouvent les points d'ancrage de la barre anti-roulis, les amortisseurs hydrauliques latéraux et verticaux, les butées latérales et les butées verticales hautes qui agissent en même temps comme lien positif entre la caisse et le bogie, et ce, pour éviter leur séparation dans le cas de déraillement ou de soulèvement de la caisse pour fins d'entretien. Les cylindres d'inclinaison y sont également reliés.

6.4 ROULEMENT

Le roulement proposé est du type conique de classe F et est maintenant le type le plus utilisé sur les bogies. Il peut prendre à la fois les charges axiales et radiales et est plus facile d'entretien que les roulements de types sphériques ou cylindriques.

Le roulement est représenté à la figure 6.4.

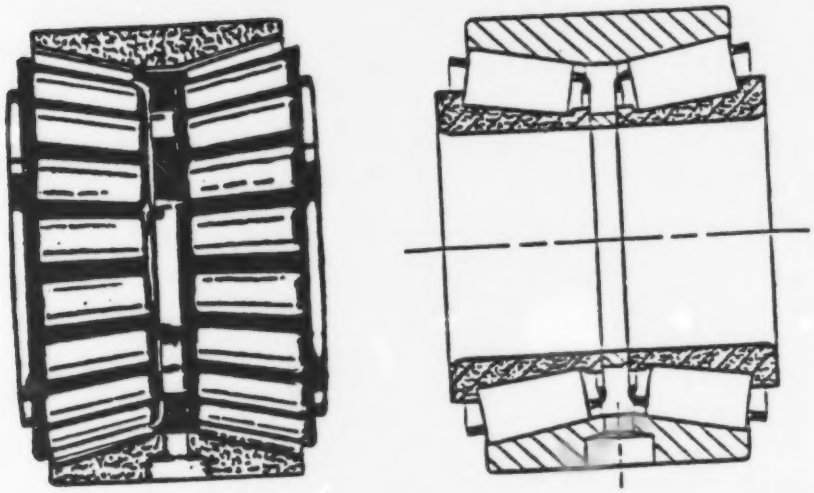


Figure 6.4

ROULEMENT

6.5 ROUE

La roue du bogie a un diamètre de 914 mm. La forme de l'âme de la roue devra être choisie avec soin, afin de minimiser le phénomène de "wobbling" qui peut apparaître lorsque les gradients thermiques résultant de l'échauffement de la plage de roulement durant les freinages sévères sont élevés.

Pour l'application banlieue, la roue aura un diamètre de 864 mm.

Le profil de la roue reste à définir.

6.6 SUSPENSION PRIMAIRE

Dans le cas de notre application et pour des raisons de dégagement, réduction de masse, ajustement du ratio des fréquences verticales du bogie, facilité d'entretien et haute fiabilité, nous avons choisi un arrangement du type bielles semblable à ceux retrouvés sur certains bogies français et italiens. Ce type de lien a été conçu pour améliorer la facilité d'entretien, réduire les efforts angulaires sur les roulements, augmenter la résistance mécanique de la pièce et enfin pouvoir mieux ajuster les rigidités longitudinale et transversale de la suspension primaire du bogie.

La suspension verticale est assurée par des ressorts doubles hélicoïdaux qui agissent en parallèle avec un amortisseur hydraulique pour réduire les amplitudes de tangage à haute vitesse. La suspension primaire horizontale est composée de "silentblocs" et est conçue de manière à simplifier le montage.

La boîte de roulement pourra recevoir les sondes du système de détection de boîtes chaudes et du système de détection de vitesse.

Pour le remplacement et/ou le reprofilage des roues, il suffira d'enlever les collets inférieurs des boîtes libérant ainsi l'essieu sans avoir à débrancher ou déplacer l'amortisseur, les butées, les ressorts, les câbles, le détecteur de vitesse, le détecteur de boîte chaude et les courroies de mises à la terre. Ce genre d'arrangement très simple permettra de réduire considérablement le temps nécessaire à l'entretien de l'essieu et de ses composants.

6.7 SUSPENSION SECONDAIRE

La suspension secondaire est faite de ballons pneumatiques du type "Sumiride". La rot tion du bogie est assurée par des ballons qui peuvent fléchir horizontalement de 125 mm. Les ballons sont munis de butées caoutchoutées qui assureront à la voiture un confort latéral presque inchangé et un confort vertical réduit en cas de bris d'éléments du système de la suspension pneumatique. L'amortissement vertical est fourni presque entièrement par les ballons, réduisant les efforts sur les amortisseurs hydrauliques et prolongeant ainsi leur durée de vie. L'amortissement latéral est fourni par un amortisseur hydraulique installé transversalement entre la traverse d'inclinaison et la traverse de liaison. Les amortisseurs verticaux sont installés à l'extrémité de la traverse.

Au niveau de la suspension secondaire, le roulis de caisse est contrôlé à l'aide d'une barre de torsion. Cet arrangement est essentiel pour réduire les débattements de caisse en roulis et diminuer, en courbe, l'accélération centrifuge non compensée, causée par le déversement extérieur de la caisse.

6.8 FREINAGE

L'équipement de freinage du bogie sera du type pneumatique. Ce genre de système est plus fiable et plus léger que les systèmes air/huile. L'effort de freinage sera réparti entre les roues et les disques dans des proportions de 25 et de 75% respectivement.

Dans le but de faciliter l'entretien des équipements de freinage, la poutre supportant l'unité du disque est conçue pour en faciliter le démontage. Chacune des poutres peut être enlevée verticalement une fois que les quatre (4) boulons d'ancrage sont enlevés. Cet arrangement facilite grandement l'entretien tout en permettant de travailler sur les équipements de freinage sans devoir utiliser un puits d'accès.

L'arrangement proposé pour l'unité de freinage sur la roue est plus difficile d'accès pour l'entretien. Des travaux supplémentaires sont requis pour améliorer l'accès à ce sous-ensemble. Il faudra aussi choisir soigneusement la position du sabot sur la plage de roulement de la roue; le sabot une fois bien placé pourra, entre autres, servir à nettoyer la roue, garder sa conicité et évidemment à freiner.

6.9 LIAISON CAISSE/BOGIE

La liaison caisse/bogie se compose essentiellement d'une traverse fixée au sous-châssis de la voiture et d'un pivot qui relie la traverse et le châssis au bogie. La liaison caisse/bogie sera conçue pour répondre aux normes FRA de collision.

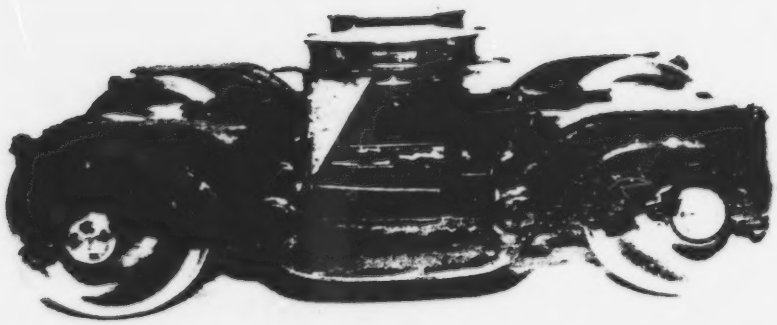
Cette liaison sera conçue de façon à être ajustable lors des essais afin de trouver la position verticale optimale.

6.10 SYSTÈME D'INCLINAISON

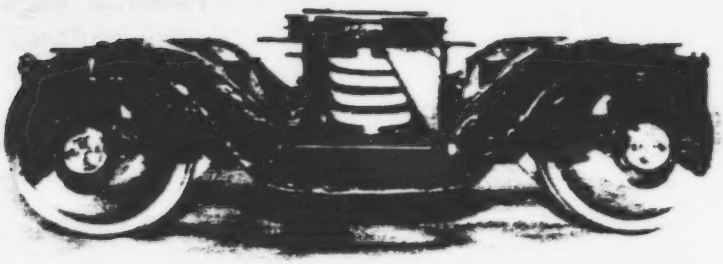
Le bogie a été conçu de manière à ce que la cinématique du mécanisme du système soit très semblable à la cinématique du bogie LRC Dofasco. Le mécanisme choisi est du type à bielles tel qu'illustré à la figure 6.1.

6.11 MAQUETTE

Une maquette a été construite pour représenter le concept du bogie pour le transport interurbain muni d'un système d'inclinaison et celui du bogie pour le transport en banlieue.



BOGIE POUR LE TRANSPORT INTERURBAIN



BOGIE POUR LE TRANSPORT DE BANLIEUE

SECTION 7

ÉTUDE DES SUSPENSIONS

7.1 BUTS

Après avoir revu les différents concepts de suspensions proposés pour les bogies destinés au service interurbain ou en banlieue, nous avons effectué des analyses pour vérifier si les éléments choisis rempliront bien leurs fonctions tant en régime statique qu'en régime dynamique. Ces analyses préliminaires nous ont permis de vérifier entre autres si les suspensions pourront:

- manoeuvrer à l'intérieur des gabarits de voies dans des conditions extrêmes;
- prévenir le renversement de la voiture;
- prévenir le déchargement des roues et le déraillement;
- assurer un guidage stable, tant en ligne droite qu'en courbe;
- filtrer les défauts de voie afin d'assurer aux passagers un bon niveau de confort et de protéger les équipements;
- réduire les efforts roue/rail (l'usure) en courbe.

À partir des objectifs de performance établis à la section 4, une étude préliminaire a été effectuée afin de déterminer les valeurs des rigidités requises pour les suspensions primaire et secondaire.

7.2 CARACTÉRISTIQUES DES SUSPENSIONS

Les sections suivantes traitent essentiellement des caractéristiques des éléments des suspensions et de leurs fonctions principales. Un sommaire des résultats d'analyses préliminaires des performances des bogies est ensuite présenté.

7.2.1 Suspension primaire

La suspension primaire assure la liaison entre l'essieu et le châssis du bogie. Ses fonctions sont principalement la réduction de l'impact des masses non-suspendues (limitées aux essieux et roues), la répartition des charges aux roues et la réduction des torsions imposées au châssis lors du "vrillage" du plan formé par les quatre points de contact roue/rail. Les fréquences naturelles des modes de pompage et de tangage du bogie sont aussi contrôlées à partir de cette suspension.

La principale caractéristique de l'arrangement de la suspension primaire choisie (Fig.7.1) est qu'il permet d'ajuster les rigidités verticale, longitudinale et latérale en fonction des objectifs de performance. La suspension primaire verticale est composée d'un ressort hélicoïdal encastré dans le châssis et déposé sur la boîte de roulement.

Les rigidités latérale et longitudinale sont obtenues à l'aide des éléments de caoutchouc (Fig. 7.2) incorporés dans la jonction biellе/châssis du bogie. Les rigidités radiale et axiale de ces éléments permettent de contrôler les mouvements de lacet de l'essieu et par conséquent assurent la stabilité du bogie. Un choix judicieux de ces éléments permettra d'obtenir une vitesse critique élevée sur une voie droite et un minimum d'usure des roues dans les courbes.

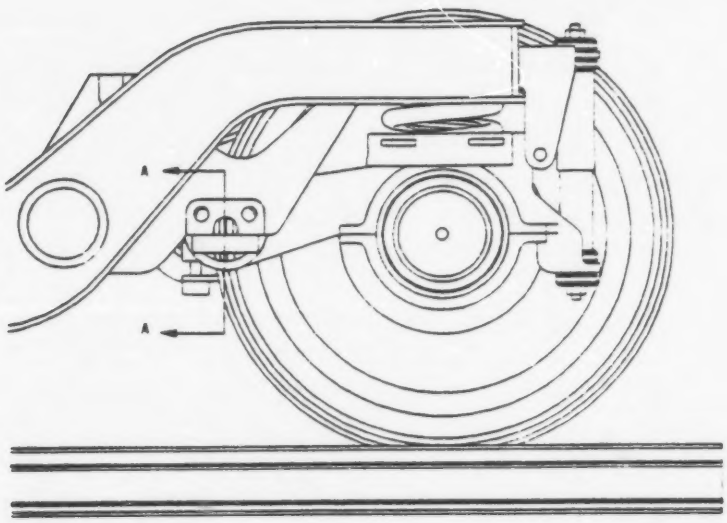
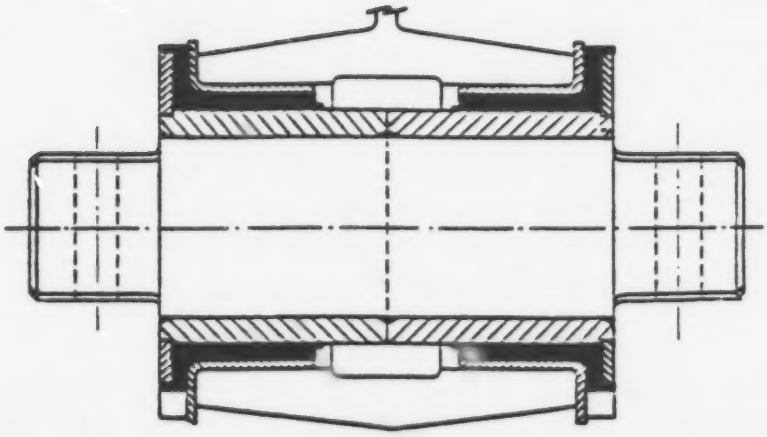


Figure 7.1

SUSPENSION PRIMAIRE



Coupe A-A

Figure 7.2

ÉLÉMENT DE SUSPENSION

7.2.2 Suspension secondaire

La suspension secondaire a pour principales fonctions de filtrer les vibrations du bogie et de contrôler les modes de vibrations de la caisse. Les principaux modes de vibrations sont le pompage, le tangage, le tamis latéral, le lacet et le roulis (voir figure 7.3).

Dans la version destinée au transport interurbain avec système d'inclinaison, le ballon procure la flexibilité verticale et latérale requise. Les paramètres de flexibilité verticale de cet élément déterminent les fréquences des modes de pompage, de tangage et de roulis de la caisse. La flexibilité latérale quant à elle contrôle les modes de tamis latéral et de lacet de la caisse. L'amortissement des modes verticaux et de roulis sera fourni, presque entièrement, par la friction de l'air circulant entre les ballons et les réservoirs auxiliaires. L'amortissement supplémentaire nécessaire sera fourni par des amortisseurs hydrauliques. L'amortissement latéral est fourni par un amortisseur hydraulique installé transversalement.

Dans les versions bogie de banlieue et bogie interurbain sans système d'inclinaison, des ressorts hélicoïdaux remplaceront les suspensions pneumatiques.

L'amortissement des modes de pompage et de roulis de caisse sera essentiellement obtenu par les amortisseurs hydrauliques installés parallèllement aux ressorts.

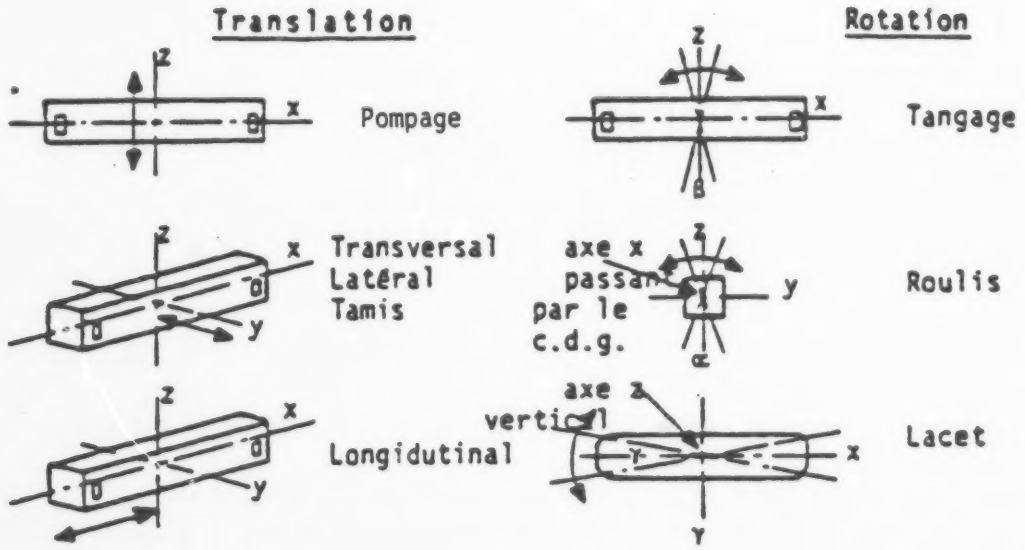


Figure 7.3

MODES DE VIBRATION

7.2.3 Liaison caisse/bogie

Les différents travaux de développement effectués par la SNCF au début des années 70 ont montré que la position de la liaison caisse/bogie avait une influence importante sur le niveau de confort vertical. Ces travaux ont en effet démontré que la liaison idéale entre le bogie et la caisse filtre les modes verticaux, longitudinaux et de tangage du bogie. Il a été prouvé que la meilleure solution consiste à placer le point d'attache caisse/bogie à la hauteur du centre de tangage du bogie.

La liaison caisse/bogie a donc été conçue pour être à peu près à la hauteur du centre de tangage, de manière à découpler au maximum les oscillations de tangage du bogie de la flexion verticale de la caisse. De plus, le pivot assurant la liaison est muni d'un manchon de caoutchouc dont les propriétés seront choisies (phase II) pour filtrer efficacement le bruit et les oscillations de tangage du bogie.

Le mécanisme de liaison assure aussi le transfert des forces longitudinales tout en offrant un minimum de résistance aux débattements latéraux et angulaires.

Le tableau 7-1 donne les valeurs des paramètres des suspensions des bogies pour le transport interurbain et en banlieue.

TABLEAU 7-1

PARAMÈTRES DES SUSPENSIONS

		Bogie Interurbain	Bogie Banlieue
Rigidité de la suspension primaire	.verticale	2,4 MN/m	3,1 MN/m
	.latérale	20 "	10,2 "
	.longitudinale	80 "	49 "
Rigidité de la suspension secondaire	.verticale	,51 MN/m	1,1 MN/m
	.latérale	,35 "	,5 "
	.longitudinale	4,0 "	4,0 "
Barre de torsion		,1 MN-m/rad.	-

Note: Les valeurs données sont pour un (1) bogie.

À la suite de cette étude des caractéristiques des suspensions, une autre étude préliminaire, cette fois sur les différents aspects de la performance du bogie, a été faite. Les conclusions de cette seconde étude se trouvent au point 7.3.

7.3 PERFORMANCES DU BOGIE

7.3.1 Gabarits

Un des premiers aspects à vérifier est la compatibilité du bogie avec les gabarits de voies. Ces gabarits sont normalement définis par les responsables des réseaux et régissent les dimensions maximales des voitures, les dégagements minimums à respecter au-dessus des voies et, quelquefois, les débattements extrêmes causés par des accélérations latérales.

Pour les bogies proposés, deux aspects ont dû être vérifiés pour assurer la compatibilité de ceux-ci avec les gabarits de certains corridors nord-américains. Ces aspects sont l'enveloppe nécessaire aux débattements de la caisse et les dégagements sous le bogie.

Il a donc fallu vérifier si la nouvelle cinématique du système d'inclinaison induit des mouvements excessifs de la caisse par rapport aux gabarits connus. La figure 7.4 montre que l'enveloppe requise pour la caisse LRC avec le nouveau système d'inclinaison est similaire à celle du LRC actuel. De plus, les suspensions des bogies (2 versions) fournissent une rigidité élevée en roulis, ce qui procurera une marge de sécurité adéquate pour circuler dans les corridors d'Amérique du Nord.

Pour vérifier les dégagements au niveau du bogie, on doit simuler la condition où tous les éléments des suspensions primaire et secondaire verticales sont brisés, en plus d'avoir des roues usées sur le bogie et déplacées latéralement sur le rail. Ces performances sont particulièrement importantes sur les réseaux ayant un troisième rail pour fournir l'énergie électrique aux automotrices de ban

COMPARAISON DES MECANISMES DU SYSTEME D'INCLINAISON

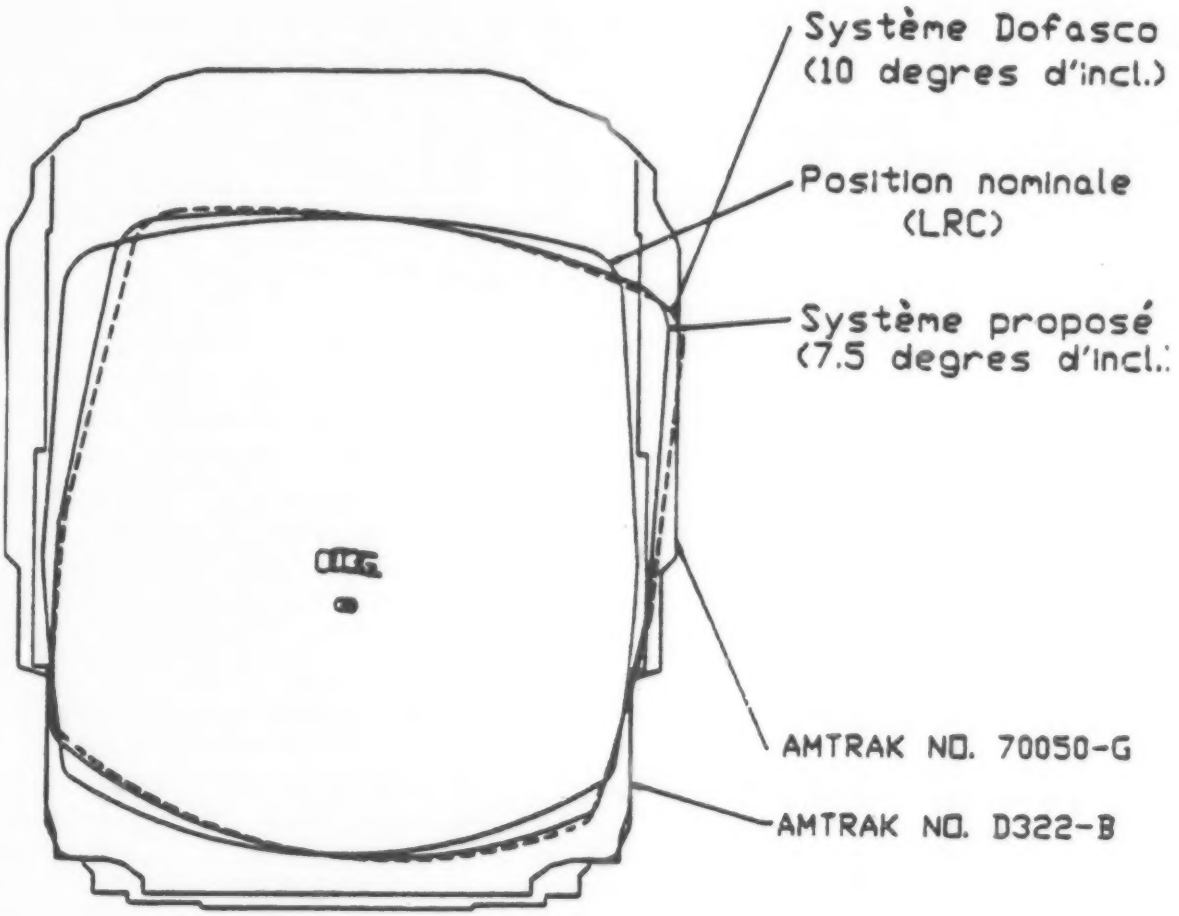


Figure 7.4

GABARITS CAISSE

lieue. La figure 7.5 montre bien que le châssis proposé n'interfère pas avec les gabarits typiques pour les deux applications.

7.3.2 Contrôle du roulis

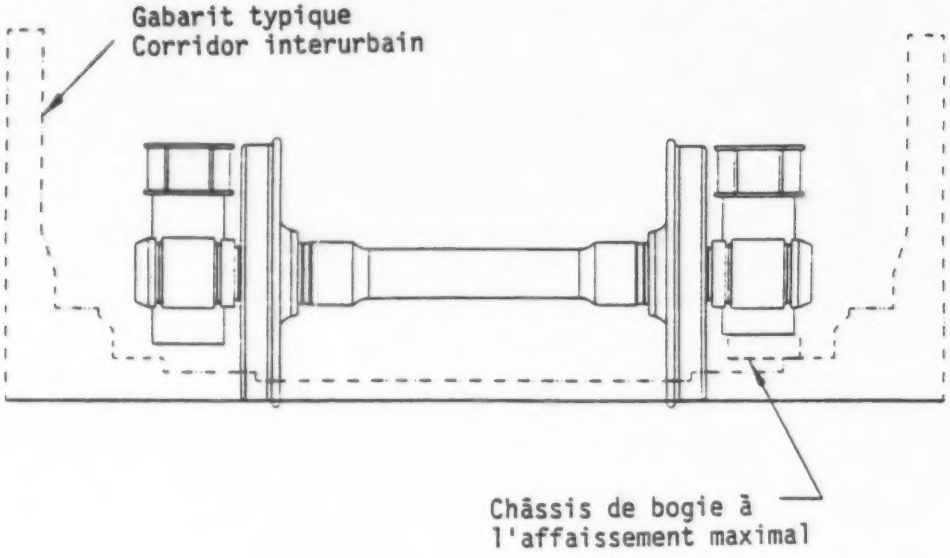
Le contrôle du roulis permet d'influencer trois facteurs importants de la performance des bogies. Ces facteurs sont:

- la largeur, la hauteur et la forme de la caisse;
- la capacité de compensation du système d'inclinaison;
- le confort des passagers.

Comme nous l'avons vu à la section précédente, la voiture et le bogie doivent être conformes aux limites du contour définissant la voie et les obstacles qui l'entourent. Ces contours ou gabarits qui étaient définis à l'origine pour des conditions statiques sont de plus en plus modifiés pour tenir compte des débattements des caisses sous l'effet de forces latérales.

Cette nouvelle exigence nord-américaine suit la tendance, depuis longtemps établie en Europe, qui veut que l'on réglemente les caractéristiques de roulis des voitures. En effet, la norme UIC 505 définit des limites à respecter pour le coefficient de souplesse* des voitures en fonction des applications. En général, les bogies européens sont caractérisés par des coefficients de souplesse variant de 0,20 à vide à 0,35 chargé. Le coefficient de

Note: * Le coefficient de souplesse est un ratio qui quantifie la souplesse en roulis d'un véhicule muni de suspensions.



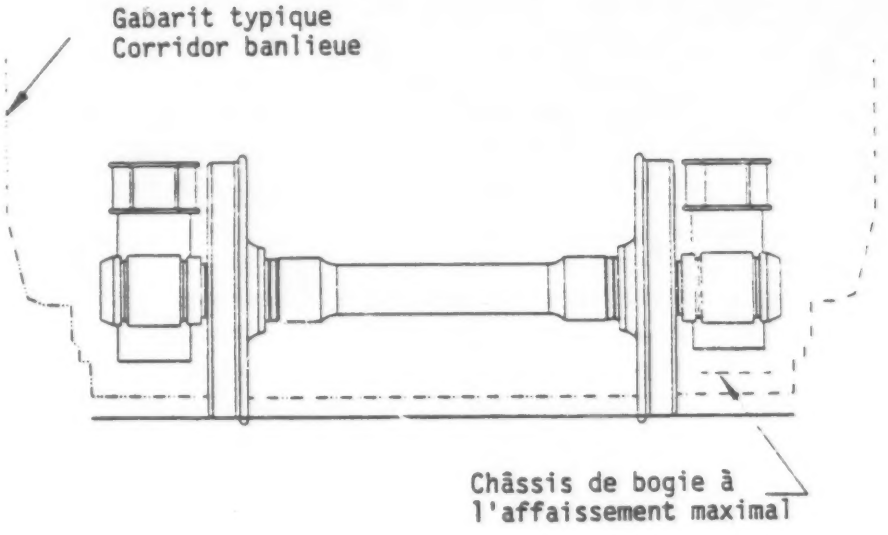


Figure 7.5

GABARITS BOGIE

souplesse visé pour les bogies proposés se situe à environ 0,4, valeur maximale acceptée par UIC.

Afin d'évaluer les caractéristiques en roulis des différentes versions du bogie, on a effectué une analyse paramétrique. Cette analyse évalue le coefficient de souplesse pour les bogies interurbain et de banlieue avec différentes rigidités équivalentes en roulis. Le graphique de la figure 7.6 illustre les résultats de l'analyse.

En utilisant les rigidités données au tableau 7-1, on peut évaluer le coefficient de souplesse des différentes versions du bogie. Ainsi, le bogie de banlieue aura un coefficient variant de 0,22 à 0,42, ce qui satisfait aux exigences des gabarits cinématiques pour une application de banlieue.

Le bogie pour utilisation interurbaine aura un coefficient variant de ,35 à ,5.

Somme toute, le phénomène de roulis, qu'il soit statique ou dynamique, influence défavorablement le confort des passagers.

Cette influence se ressent surtout en courbe par les effets de l'accélération centrifuge non compensée, par les amplitudes larges qui sont plus ou moins ressenties comme des mouvements latéraux et par la vitesse de roulis de caisse dans les transitions.

Dans le but de minimiser ces effets, le bogie a été conçu de façon à ce que le centre de roulis résultant soit inférieur au niveau des rails en permettant un débattement latéral de la caisse de $\pm$60 mm. Ainsi, même si le roulis n'est pas complètement éliminé, ses effets

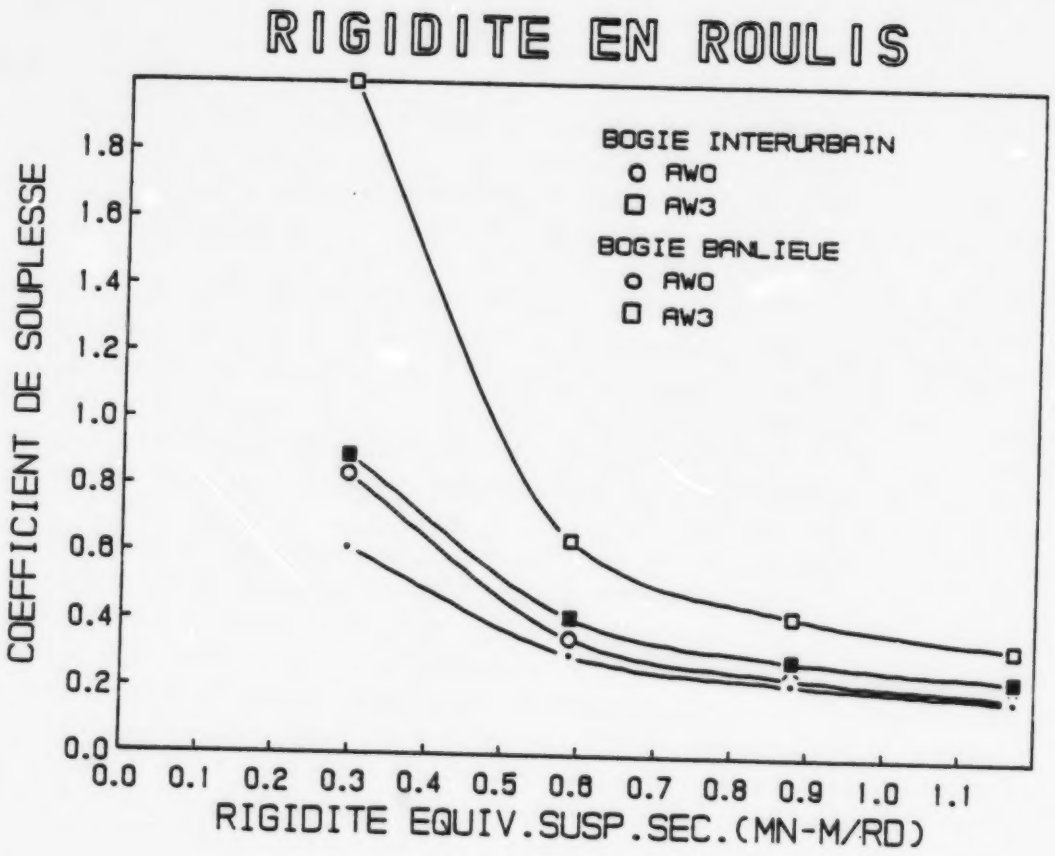


Figure 7.6

COEFFICIENT DE SOUPLESSE

seront ressentis surtout comme des mouvements latéraux d'amplitudes moyennes et de faibles fréquences.

7.3.3 Renversement de la voiture

Un des aspects importants concernant les voitures interurbaines, opérant à haute vitesse dans les courbes, est le potentiel de renversement de la voiture. Cet aspect est considéré comme le principal facteur limitant la vitesse de la voiture en courbe. Une étude préliminaire a été effectuée afin d'évaluer les performances des bogies proposés.

Le critère choisi pour faire l'analyse est le même que celui utilisé par la firme Ensco dans une étude faite pour le compte du département du transport américain*. Ce critère a été développé par les Japonais(JNR) et recommande qu'en tout temps les roues ne puissent se décharger de plus de 60 %.

En tenant compte de l'effet d'un vent de 85 km/h, soufflant dans la même direction que la force centrifuge sur une voiture en courbe, le déchargement maximum permis, par roue, chute à 40 % pour la voiture interurbaine (avec système d'inclinaison) et à 30 % pour la voiture de banlieue. Le graphique de la figure 7.7 donne les valeurs d'insuffisance du dévers en fonction des pourcentages de déchargement des roues.

Note: * Ref: High Cant Deficiency testing of the LRC, the AEM-7 locomotive and the Amcoach, par L.L.Boyd, R.E.Scofield & J.P.Zaiko. NO. DOT-FR-81-06, Janv.1982.

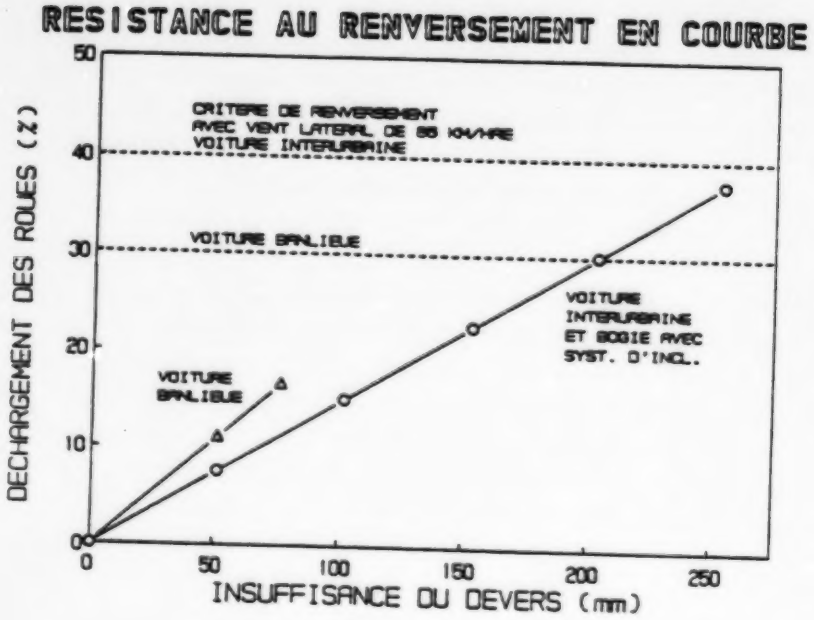


Figure 7.7

INSUFFISANCE DES DÉVERS EN FONCTION
DU DÉCHARGEMENT DES ROUES

NOTE: * L'insuffisance du dévers est une autre façon de définir la vitesse maximale permise en courbe. Pour les voitures sans système d'inclinaison, la valeur maximale est fixée d'après la valeur limite de AAR qui est de ,05 g ou 76 mm.

Dans le cas des voitures équipées de système d'inclinaison, la valeur maximale d'insuffisance du dévers est davantage fixée par les normes de sécurité en courbe que par les valeurs d'accélérations latérales ressenties par les passagers (limite AAR).

7.3.4 Déchargement et déraillement

Dans le but d'éviter les déraillements pouvant survenir lors des passages en courbe à basses vitesses, il faut vérifier si les rigidités des suspensions primaire et secondaire ont été choisies adéquatement.

Trois critères sont normalement utilisés pour vérifier les performances en courbe d'un bogie. Ces critères sont:

- la limite de déchargement des roues sur une voie vrillée (15 % de déchargement pour vrillage de 25 mm sur 2,7 m);
- le rapport entre le couple anti-rotation du bogie sur la charge par essieu, multiplié par l'empattement du bogie, doit être au maximum de 0,08[1];
- le rapport entre les forces latérales et verticales (4V) d'une roue du bogie lorsqu'il est en courbe ne doit pas excéder, en régime stationnaire, la limite de Nadal[2].

Les sections suivantes présentent les calculs préliminaires effectués pour évaluer les performances des bogies proposés.

Note: 1- Critère de Kauffman : Ratio pour évaluer la résistance à la rotation du bogie relativement à la caisse dans les courbes.

2- Critère de Nadal : Ratio pour évaluer la tendance au déraillement d'un bogie.

A) Déchargement des roues

Le déchargement des roues est essentiellement fonction de la rigidité de la suspension primaire verticale du bogie. Ce critère est normalement imposé afin d'éviter le déraillement du bogie sur des voies comportant des sections sévèrement vrillées.

Les calculs montrent que le déchargement maximum d'une roue, après un soulèvement de 25 mm, est inférieur à la limite de 15 % pour le bogie interurbain et légèrement supérieur pour la version banlieue. Ceci est dû à la rigidité de la suspension primaire qui, dans la version banlieue, a été augmentée pour limiter les déflections dues aux charges plus élevées. Dans le cas où le bogie pour le transport en banlieue devrait être conforme à la limite de 15 %, la rigidité pourrait être réduite et les butées pourraient être placées ailleurs.

B) Résistance à la rotation du bogie

Le critère de Kauffman est utilisé pour vérifier si la valeur du couple nécessaire pour tourner le bogie sous la caisse est suffisamment faible pour éviter de dérailler dans les courbes.

À partir des données préliminaires établies pour les bogies proposés on obtient les résultats suivants:

TABLEAU 7-2

VALEURS KAUFFMAN

BOGIES	RATIOS
Interurbain sans amortisseur anti-lacet	.05
Interurbain avec amortisseur anti-lacet	.08
Banlieue	.08

Ces valeurs estimées devront être vérifiées lors d'essais. Elles sont égales ou inférieures à la limite Kauffman de ,08.

C) Rapport L/V en courbe

La modélisation classique du phénomène de déraillement d'une roue, trouvée par Nadal en 1896, prédit, à l'aide d'une expression simple, un rapport critique entre la force latérale et la force verticale à l'interface roue/rail. La formule de Nadal donne une limite conservatrice. Elle ne tient pas compte des phénomènes transitoires qui engendrent des ratios de forces plus élevés et de très courte durée. Toutefois, le ratio des forces obtenues peut être utilisé pour une évaluation préliminaire des performances en courbe des bogies proposés.

L'évaluation préliminaire des forces générées en courbe a été faite à l'aide du programme d'analyse de performance du bogie en courbe. Ce programme solutionne un ensemble d'équations représentant les forces agissant à l'interface roue/rail, en fonction des caractéristiques géométriques des zones de contact existantes entre les roues et les rails. Le programme utilise un algorithme itératif qui recherche la position d'équilibre du bogie sur les rails. Les principales données fournies au programme sont:

- les caractéristiques générales du bogie;
- une table définissant le profil de la plage de roulement de la roue et de la tête du rail;
- une table donnant les coefficients nécessaires à l'évaluation des forces générées dans la zone de contact roue/rail.

Les résultats obtenus du programme sont:

- les déplacements latéraux et angulaires des essieux et du châssis du bogie;
- les forces et moments agissant sur les roues;
- les rapports L/V;
- les indices d'usure des roues.

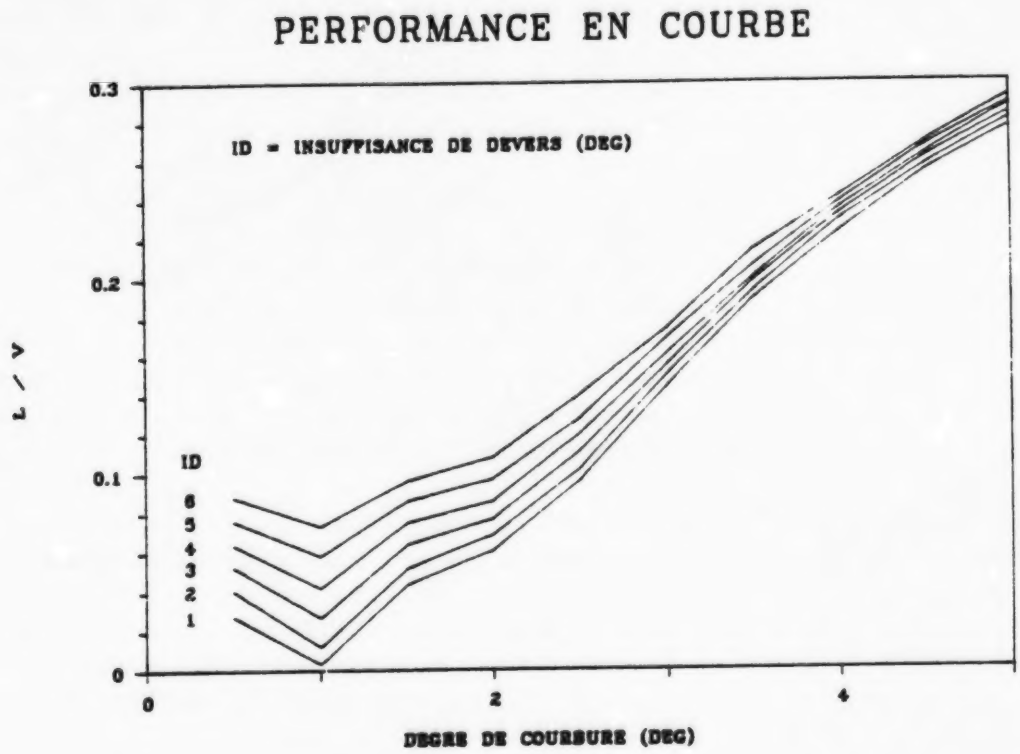


Figure 7.8

FORCES L/V SELON LE CRITÈRE DE NADAL

Cette information permet de vérifier, par analyse comparative, la conformité du profil choisi aux exigences de l'application. Elle peut aussi être utilisée pour vérifier si un bogie aura tendance à dérailler.

Afin de vérifier si le choix initial des éléments de suspensions est adéquat, un calcul a été effectué à l'aide du programme. Les résultats (fig. 7.8) montrent que ce choix est adéquat pour une opération sur des courbes de rayons variant de 350 m (5°) à 3500 m (,5°).

7.3.5 Stabilité latérale

Il existe, pour tout véhicule ferroviaire, une vitesse à laquelle certains modes de vibrations sont caractérisés par des mouvements latéraux répétitifs et de grande amplitude. Ces mouvements, en plus d'être une source d'inconfort, peuvent engendrer des bris de composants du véhicule et même présenter une condition d'opération marginale du point de vue de la sécurité. Ainsi, la vitesse critique du véhicule est un critère important et doit être sérieusement considérée lors de la conception d'un bogie.

Cette section présente les travaux qui ont été effectués, à ce jour, pour évaluer la vitesse critique du bogie.

Les travaux d'évaluation de la vitesse critique ont été amorcés avec le programme "SLISO", qui génère des résultats pour une série de combinaisons différentes des rigidités latérales et longitudinales de la suspension primaire. Ces rigidités sont les principaux facteurs contrôlant la vitesse critique d'un bogie.

Le programme permet d'effectuer, relativement rapidement, une étude paramétrique sur les suspensions. Les résultats sont présentés sous forme de courbes de niveau constant qui correspondent à des vitesses critiques. Des résultats préliminaires sont présentés, sous cette forme, à la figure 7.9.

Bien que l'outil d'analyse soit puissant, (il effectue environ 100 000 inversions de matrice 9 X 9 pour générer ces résultats), il n'est qu'un guide dans le choix des paramètres de la suspension. D'autres séries d'études devront être effectuées pour vérifier plus en profondeur la stabilité globale de la voiture.

Les résultats présentés à la figure 7.9 sont ceux du bogie interurbain dans sa version avec système d'inclinaison. La figure 7.9 illustre les résultats pour un profil de roue neuve (conicité 1/20) sur un rail typique AREA 132.

La vitesse critique évaluée par le programme pour les paramètres de suspension primaire du tableau 7-1 donne 320 km/h pour la roue neuve et 240 km/h pour la roue usée. Ces analyses ont pour but de mettre au point un bogie pouvant être utilisé à 240 km/h.

7.3.6 Confort

Le dernier aspect concernant les performances dynamiques d'un véhicule est le confort.

Cette section rappelle les principaux aspects à examiner lors de l'évaluation du confort des passagers.

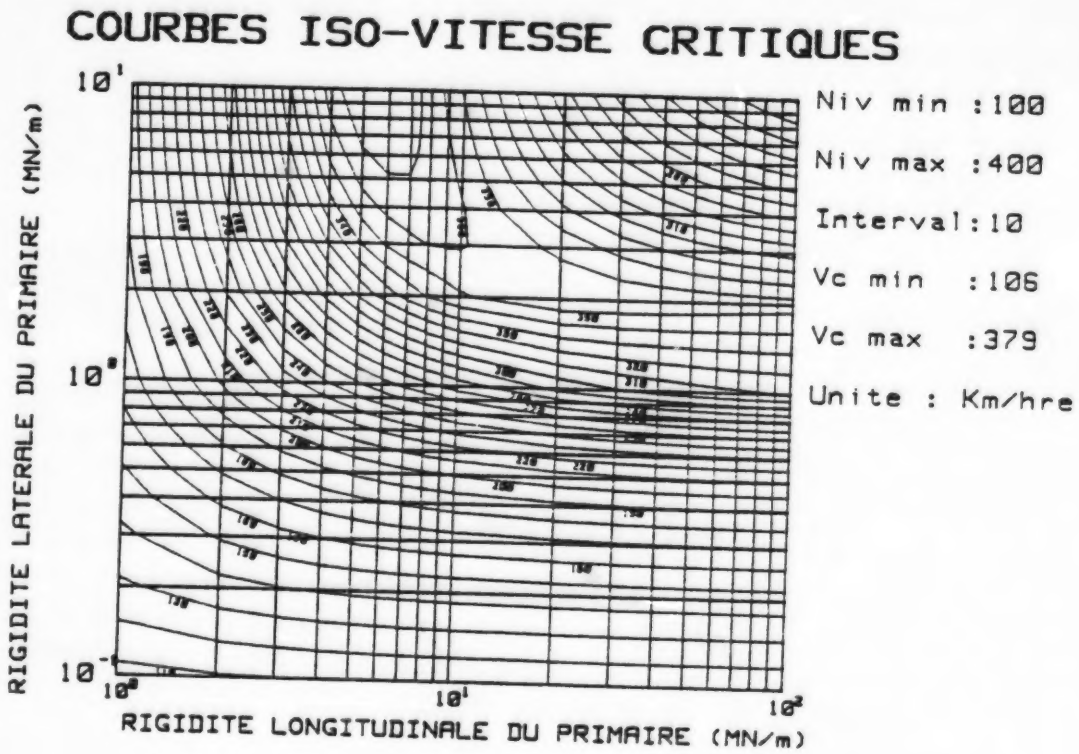


Figure 7.9

COURBES ISO-VITESSES CRITIQUES

A) Facteurs déterminants dans le confort d'un véhicule

a) Le corps humain est un système physique et biologique d'une nature extrêmement complexe. Vu en tant que système mécanique, il comprend un grand nombre d'éléments "linéaires" et non "linéaires"; les propriétés mécaniques varient beaucoup d'un individu à l'autre. Du point de vue biologique, la situation est encore plus complexe, surtout sur le plan des effets psychologiques.

Les effets d'oscillations répétées ont été étudiés sur un être humain transformé en un modèle mathématique masses-ressorts-amortisseurs. Les résultats comparés d'études et d'expériences ont démontré que le corps humain pouvait être correctement modélisé en utilisant des éléments linéaires. En soumettant ce modèle à une excitation répétée (réponse forcée), il a été possible de simuler ce que ressent le passager d'un véhicule, dans les positions assise ou debout.

L'examen plus en profondeur de la réponse du corps humain aux oscillations répétées de basses fréquences montre que, dans la bande 3-6 Hz, l'abdomen est particulièrement vulnérable, et que pour la bande 20-30 Hz, le phénomène est similaire pour l'ensemble tête-cou-épaules. La bande 50-80 Hz touche particulièrement les yeux.

Par contre, pour les oscillations de fréquences supérieures à 100 Hz, il semble qu'il y ait une plus grande atténuation, surtout au niveau de la tête, si le sujet est debout. Ces atténuations peuvent parfois être de l'ordre de 40 db selon la fréquence et le trajet parcouru par les ondes dans le corps humain.

Les dernières techniques informatiques permettent d'effectuer des simulations beaucoup plus complètes à partir de modèles mathématiques, tel celui présenté à la figure 7.10.

Ce modèle comprend une centaine de degrés de liberté en considérant les mouvements de translations et de rotations pour chacune des masses dans les trois axes principaux.

b) Les sources d'excitations

Les excitations qui affecteront le passager (système masses-ressorts) proviennent en majeure partie des imperfections et irrégularités des roues et des rails. Ces excitations sont normalement regroupées en deux catégories. On retrouve, d'une part, les phénomènes périodiques de longueur d'onde fixe et les phénomènes aléatoires. Les phénomènes transitoires ressentis lors des passages sur les viaducs, croisements et intersections affectent le confort des passagers mais sont difficiles à estimer et à simuler.

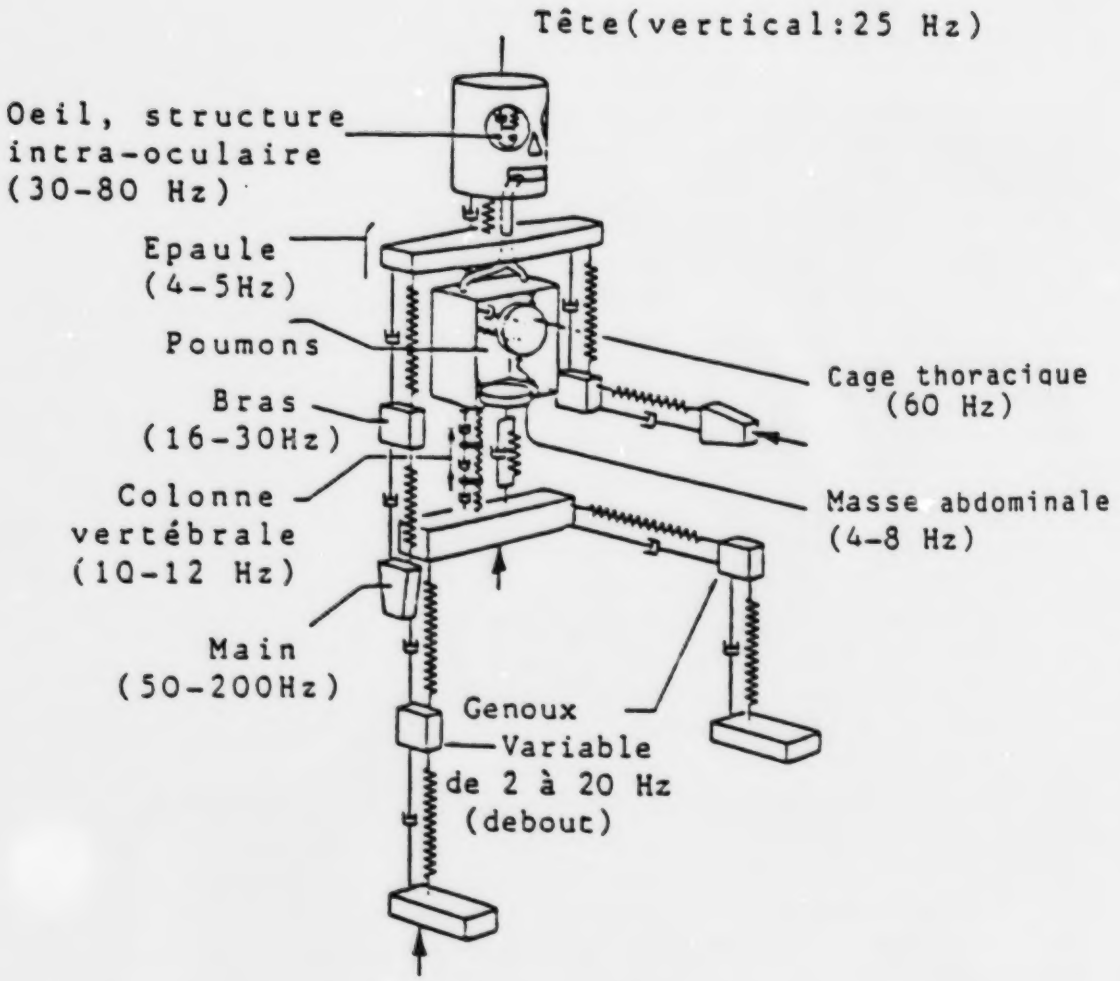


Figure 7.10

MODÈLE MASSES-RESSORTS-AMORTISSEURS DU CORPS HUMAIN

Parmi les excitations périodiques, on retrouve:

- les irrégularités sur les roues;
- la fréquence d'empattement du bogie qui excitera le pompage ou le tangage du bogie lorsque l'empattement du bogie est un multiple d'une longueur d'onde d'un défaut de la voie;

- la fréquence d'empattement de la caisse qui est similaire à la précédente mais qui a trait à la distance entre les bogies;
- la fréquence cinématique du bogie;
- la fréquence des joints de rails;
- la fréquence des dormants.

Ces excitations étant de longueur d'onde constante, il en résulte que la fréquence sera proportionnelle à la vitesse d'opération de la voiture.

Concernant les excitations aléatoires, des données statistiques compilées lors de différentes études ont conduit à l'établissement de courbes empiriques donnant la densité spectrale des défauts de voie en fonction de la longueur d'onde. Ces courbes ont été définies pour différentes catégories de voies (classes 2 à 6).

c) Filtrage des excitations

Les bogies modernes sont équipés de deux étages de suspension pour filtrer les imperfections et irrégularités de la voie.

Normalement, la suspension primaire filtre l'ensemble des fréquences supérieures à 10 Hz alors que la suspension secondaire filtre les fréquences supérieures à 1,5 - 2,0 Hz. Le taux de transmissibilité résultant est fonction de l'amortissement présent à chacun des étages de la suspension.

B) Évaluation du confort

L'évaluation du confort d'une voiture consiste essentiellement à estimer la transmissibilité des forces entre les étages de la suspension.

Dans la phase initiale du projet, des modèles simples ont été utilisés pour valider le choix des rigidités des éléments de suspension. Pour faire ces vérifications, il a fallu évaluer les fréquences naturelles présentes dans l'ensemble masses-ressorts que sont le bogie et la caisse.

Le tableau 7-3 donne les fréquences naturelles pour les deux versions du bogie.

TABLEAU 7-3

FRÉQUENCES NATURELLES (HZ)

	VERSION INTERURBAINE		VERSION BANLIEUE	
Mode	Bogie	Caisse	Bogie	Caisse
Pompage	4,6	0,8	6,4	1,1
Tangage	8,0	1,0	10,0	1,5
Lacet	-	0,6	-	0,6
Roulis centre bas	-	0,8	-	0,8
Flexion de caisse	-	9,2	-	8,0

Il est à remarquer que les rigidités de la suspension primaire ont été ajustées de façon à éviter de coupler le tangage du bogie avec le mode de flexion de la caisse. Dans le cas du bogie version banlieue, la fréquence de tangage a été estimée à 10 Hz soit 2 Hz de plus que le mode de flexion de la caisse pour application banlieue.

L'évaluation de la transmissibilité s'est faite à l'aide d'un modèle incluant les essieux, la masse suspendue du bogie, la masse de la caisse au-dessus du bogie et la masse équivalente au centre de la voiture. Ce modèle analyse la transmissibilité et la réponse en fréquences en fonction de différentes excitations au niveau des essieux. Les courbes typiques de densité spectrale

des défauts de voies sont utilisées pour déterminer les perturbations soumises aux essieux.

Les figures 7.11 et 7.12 incluent les résultats d'une première estimation des accélérations verticales obtenues pour la voiture LRC et pour une caisse LRC équipée des nouveaux bogies (2 versions).

Il est à remarquer que la transmissibilité du bogie interurbain est plus faible pour les fréquences supérieures à 4 Hz.

Cette différence est essentiellement due à la suspension primaire qui est plus souple et qui, par conséquent, filtre mieux les perturbations affectant le mode de flexion de la caisse.

Dans le cas du bogie version banlieue, les rigidités primaire et secondaire ont été augmentées pour satisfaire aux objectifs concernant la hauteur du plancher. De ce fait, la fréquence de pompage du bogie est plus élevée, ce qui résulte en une diminution du filtrage des défauts de voie. Un compromis devra être fait quant au choix de la suspension secondaire (ressort hélicoïdal ou ballon avec soupape de nivellement) en fonction du niveau de confort désiré dans la voiture.

Ces premières évaluations faites à partir d'un modèle simple devront être complétées par des études utilisant des modèles plus élaborés. Un programme, actuellement en développement, permettra

d'analyser plus adéquatement le comportement vibratoire d'une caisse. Ce programme analysera tout particulièrement la relation existant entre la hauteur de la liaison caisse/bogie et la transmissibilité des vibrations verticales au centre de la caisse. Cet outil sera d'une grande utilité pour optimiser les capacités de filtrage du bogie.

Ces différents travaux seront complétés durant la phase II du projet.

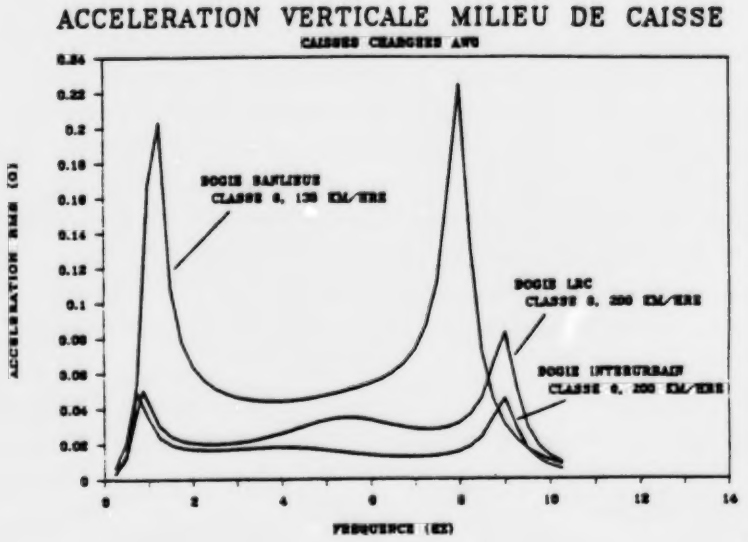


Figure 7.11

SPECTRE D'ACCÉLÉRATION VERTICALE EN MILIEU DE CAISSE AWO

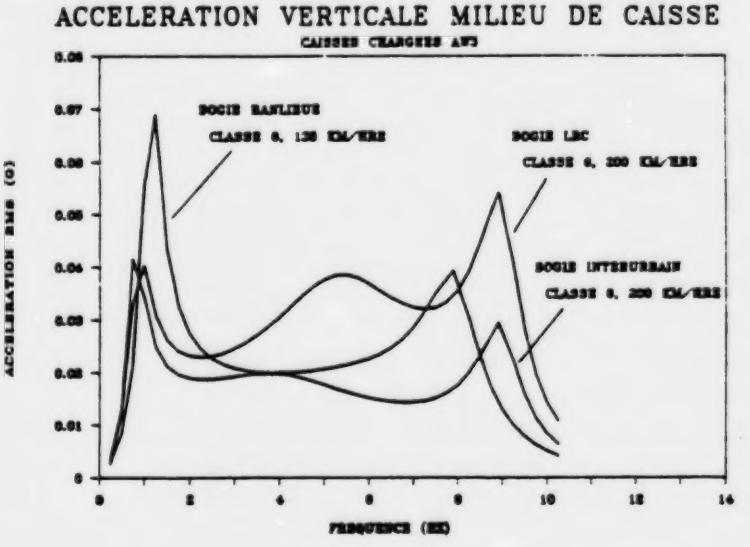


Figure 7.12

SPECTRE D'ACCÉLÉRATION VERTICALE EN MILIEU DE CAISSE AW3

SECTION 8

ANALYSE DE STRUCTURE

8.1 INTRODUCTION

L'analyse structurale a pour objectif global de vérifier si les éléments de la structure du bogie pourront résister aux charges qui lui sont imposées pour une période d'utilisation de 30 ans. Pour l'étude conceptuelle (phase I), les analyses ont plutôt été faites pour vérifier si la géométrie des principaux composants structuraux du bogie est correcte (sans problème majeur), de manière à nous permettre de poursuivre la conception.

Les études effectuées jusqu'ici incluent principalement une revue des critères de design, l'examen de certains aciers pour le châssis du bogie et l'analyse structurale préliminaire du châssis du bogie.

Les points 8.2, 8.3 et 8.4 résument les travaux faits en phase I.

8.2 CRITÈRES DE DESIGN

Les critères de design peuvent être définis comme étant des cas de chargements statiques et dynamiques sur les éléments de structure du bogie. Ces critères doivent être très bien définis car ils seront utilisés pour les analyses et les essais sur banc. Ils représentent la source de données qui nous permettront, au long des analyses et essais, de concevoir les éléments de structure du bogie capables de répondre aux exigences posées antérieurement.

Les critères de chargement dynamique et les facteurs de sécurité retenus proviennent d'une étude comparative des normes utilisées en Europe et en Amérique du Nord. Ces normes varient selon les conditions d'opération et/ou les applications.

Les critères de chargement qui ont servi aux analyses sont présentés au tableau 8-1.

Tableau 8-1

CRITÈRES DE CHARGEMENT

CHARGEMENTS	STATIQUE	DYNAMIQUE	FACTEURS DE SÉCURITÉ
. Vertical	1,3 g*	Ø,3 g	1,5
. Latéral	Ø,3 g	Ø,3 g	1,5
. Longitudinal	Ø,2 g	Ø,2 g	1,5

* : "g" = force d'accélération gravitationnelle

8.3 CHOIX DES MATÉRIAUX

La fiabilité et la résistance des éléments structuraux du bogie reposent en partie sur le choix des aciers utilisés. Les conditions d'utilisation en Amérique du Nord et plus particulièrement au Canada (températures froides) orientent le choix du type d'acier pour le bogie mécano-soudé.

Les critères d'évaluation des aciers étudiés ont été établis en se basant principalement sur les caractéristiques de résistance à basse température, de soudabilité et de résistance en fatigue.

L'acier choisi devra:

- avoir des propriétés mécaniques caractérisées par une haute limite élastique afin d'obtenir un châssis le plus léger possible;

- être facile à usiner;
- être facilement soudable sans préchauffage;
- avoir une résilience élevée à basse température afin de résister adéquatement aux impacts et à la propagation des fissures;
- conserver ses propriétés mécaniques après avoir subi un traitement thermique;
- être ductile pour permettre le pliage à froid;
- avoir une micro-structure dite "à grains fins" et sans discontinuités pour minimiser la propagation des fissures.

À l'aide de ces critères de sélection, une étude comparative a été faite sur dix (10) bogies dont les caractéristiques des matériaux étaient connues. Les résultats de cette étude montrent que très peu des types d'aciers utilisés, pour les bogies analysés, rencontrent le critère de résilience à faible température ainsi que le niveau minimum requis des limites élastiques et ultimes. Le critère de résilience à basse température est primordial pour une utilisation au Canada, ce qui n'est pas le cas pour les bogies européens.

À la suite des discussions avec les manufacturiers d'aciers, il a été conclu que l'acier qui pourrait satisfaire à toutes les exigences énoncées ci-haut ne serait pas un acier standard normalement utilisé pour les bogies. Les types d'aciers développés pour les vaisseaux sous pression pour les régions arctiques ont donc été retenus pour le bogie mécano-soudé. Le choix final du type d'acier jugé approprié pour le bogie s'effectuera au début de la phase II. Ce choix sera fonction d'une part des critères de sélection établis, et d'autre part de la possibilité d'obtenir le matériau choisi en petite quantité (20 à 25 tonnes).

8.4 ANALYSE DU CHÂSSIS

8.4.1 But

Le présent travail se propose de vérifier l'intégrité du châssis du bogie en utilisant la méthode de calcul par éléments finis. Ultérieurement, les résultats des analyses permettront:

- d'optimiser le design;
- d'optimiser le poids;
- d'identifier les endroits les plus sollicités qui devront par conséquent être suivis de près durant les essais sur banc.

8.4.2 Méthode d'analyse

Le programme utilisé pour le calcul par éléments finis est "Ansys" de Swanson Analysis Systems Inc. En premier lieu, un modèle global par poutres à sections variables permet de trouver l'emplacement et d'étudier les sections critiques du châssis en tenant compte de l'ensemble du modèle et de l'asymétrie des charges (système d'inclinaison). Par la suite, un modèle détaillé, avec des éléments plaques, permettra de mieux prédire le comportement des composants d'assemblage du châssis.

Plusieurs cas de chargement ont été étudiés, compte tenu du système d'inclinaison de la caisse et de la nécessité d'isoler les charges dynamiques (calculs de fatigue).

8.4.3 Modèle global

Le modèle global utilise des éléments poutres à sections variables (STIF 44). Tous les éléments de la suspension primaire sont inclus dans le modèle (Fig. 8.1 et 8.2).

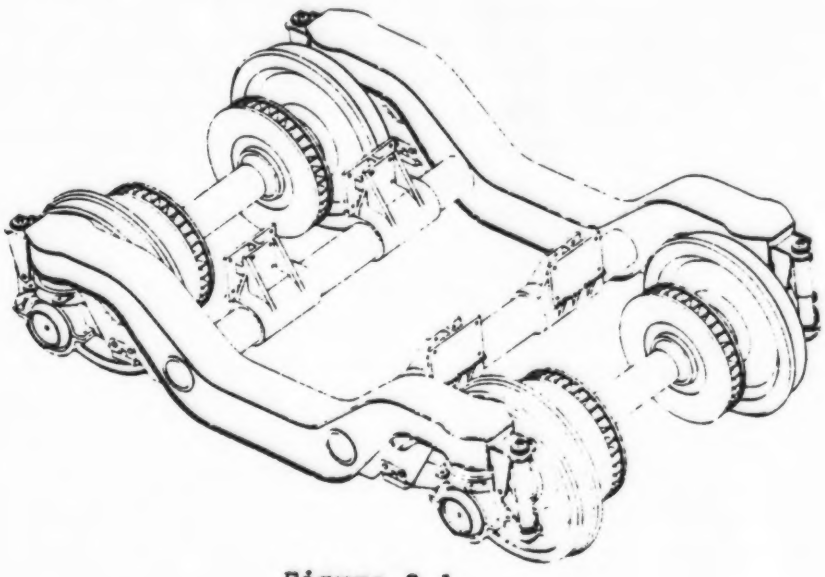


Figure 8.1

MODÈLE GLOBAL: ENSEMBLE ESSIEUX/CHÂSSIS

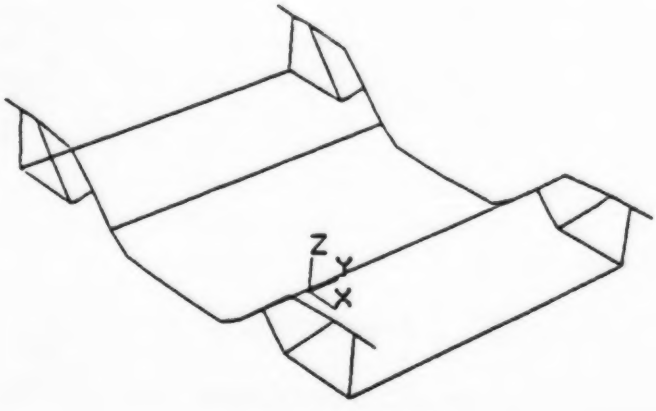


Figure 8.2

MODÈLE GLOBAL

8.4.4 Modèle détaillé

Le modèle détaillé servira à étudier l'interface traverse/longeron dans les cas de chargement les plus critiques du modèle global. Le modèle utilise essentiellement des éléments plaques (STIF 63) et tous les éléments de suspension du modèle global. Afin de réduire les temps de calcul de l'ordinateur, nous avons modélisé le quart du châssis. La comparaison des forces de réaction des deux modèles servira à confirmer leur analogie.

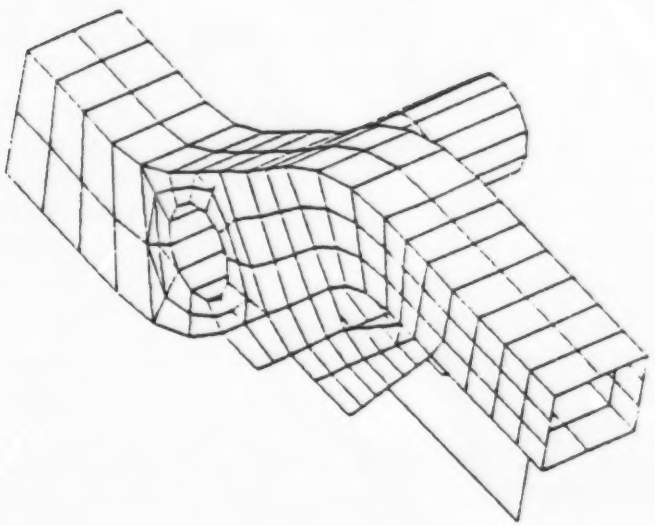


Figure 8.3

MODÈLE DÉTAILLÉ

8.4.5 Chargement du châssis

Pour le bogie muni d'un système d'inclinaison, il a été nécessaire de faire une étude de la répartition des charges verticales et latérales suivant les différentes positions de la caisse. Ceci nous permet de mieux simuler l'effet des forces qui agissent sur les traverses du châssis. L'étude de charges dynamiques va servir au calcul de fatigue du châssis.

a) Charges statiques

- Le poids maximum de la caisse et celui de tous les équipements du bogie sont inclus dans les calculs de la charge verticale;
- le programme d'éléments finis tient compte du poids du châssis;
- l'orientation respective des bielles par rapport au châssis modifie la distribution des charges.

b) Charges dynamiques

- Les critères de chargement dynamique sont basés sur les codes des chemins de fer nord-américains et européens pour les trains roulant à haute vitesse (voir point 8.2);
- toutes les charges dynamiques sont supposées en phase, ce qui représente une approche simple et conservatrice.

c) Cas de chargement

Les différents cas de chargement du châssis seront analysés individuellement et en groupes afin de déceler le ou les cas de chargement les plus critiques. Il est im-

portant d'isoler les charges dynamiques afin de pouvoir calculer la contrainte alternée qui servira aux calculs de fatigue. Ansys permet de manipuler plusieurs cas de chargement simultanément. Les conditions aux frontières varient suivant les différents cas de chargement tels qu'illustrés aux figures 8.4, 8.5, 8.6 et 8.7.

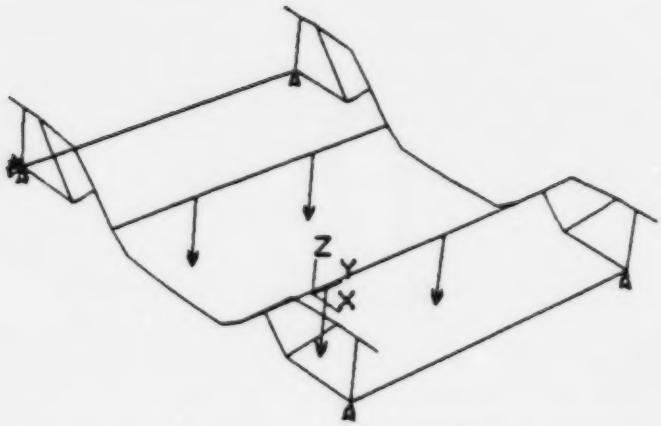


Figure 8.4

CHARGEMENT VERTICAL

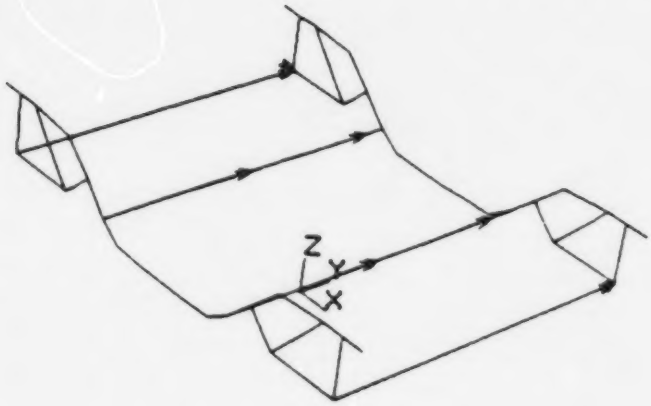


Figure 8.5

CHARGEMENT LATÉRAL

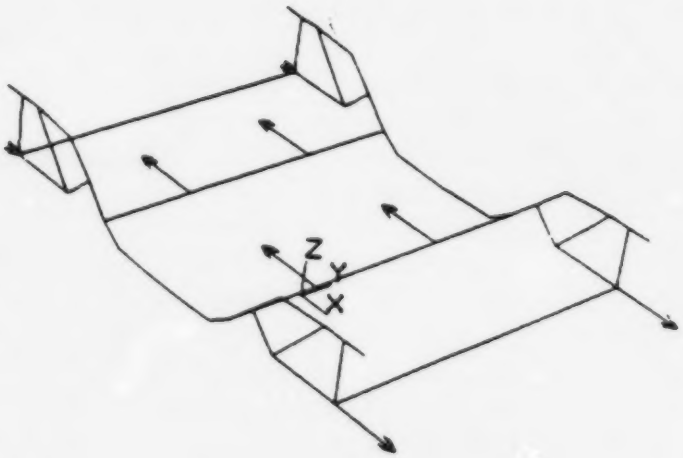


Figure 8.6

CHARGEMENT LONGITUDINAL

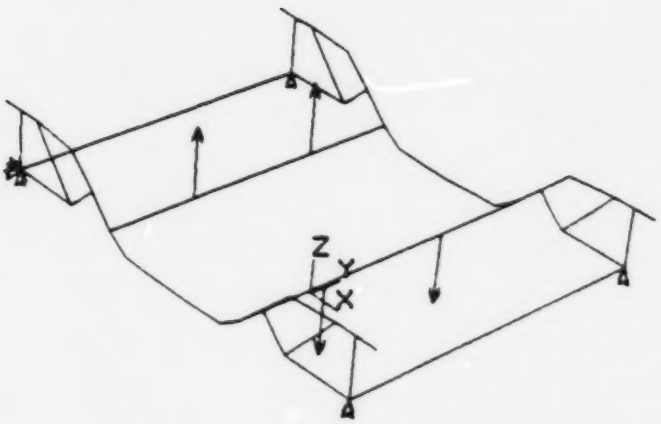


Figure 8.7

CHARGE DE FREINAGE

Les différents cas de chargement suivants seront étudiés pour les positions normale et inclinée de la caisse.

- Vertical
- Latéral
- Longitudinal
- Efforts de freinage
- Surélévation maximale de la voie
- Latéral + longitudinal
- Longitudinal + freinage
- Latéral + longitudinal + freinage
- Latéral + longitudinal + freinage + surélévation

8.4.6 Résumé des résultats

Les résultats de l'étude préliminaire du châssis font ressortir les sections où les contraintes sont les plus significatives soient:

- les traverses du châssis;
- l'interface traverse/longeron.

De façon générale, le châssis du bogie est sollicité au maximum lorsque la caisse est en position d'inclinaison maximale. On peut remarquer que la résistance en flexion des traverses tubulaires est limitée et qu'il faudra considérer des sections rectangulaires davantage appropriées à notre application.

Les résultats obtenus dans le cadre de cette analyse préliminaire démontrent que le concept du bogie mécano-soudé avec système d'inclinaison de caisse est correct du point de vue structural. Toutefois, il faudra étudier de près la fatigue des joints soudés qui constituent, pour ce genre d'applications, les endroits les plus susceptibles de se fissurer.

SECTION 9

ÉTUDE DU SYSTÈME D'INCLINAISON

9.1 INTRODUCTION

Cette section se compose de deux parties qui résument les travaux faits en phase I. La première partie concerne les analyses et travaux faits sur la cinématique et l'hydraulique du système. La deuxième traite essentiellement des analyses de réponse du système.

Ces vérifications, encore au stade préliminaire, sont essentielles et cela même pour l'étude conceptuelle. Elles permettent de vérifier si la nouvelle mécanique du système d'inclinaison pourra opérer correctement.

Tous les calculs sont faits en comparant le système du nouveau bogie à celui du bogie LRC Dofasco afin d'obtenir un système qui opérera de façon semblable.

9.2 ANALYSE DE LA CINÉMATIQUE DU SYSTÈME

L'analyse de la cinématique du système sert à:

- Évaluer le degré de stabilité du système, c'est-à-dire sa tendance à revenir en position centrale après une panne;
- calculer les débattements de la caisse par rapport aux angles d'inclinaison;
- déterminer les dimensions des cylindres d'inclinaison et de centrage;
- dériver les pressions hydrauliques maximales nécessaires à l'opération du système.

Les paragraphes suivants résument les résultats obtenus.

9.2.1 Stabilité du système

La stabilité de la mécanique du système d'inclinaison du bogie est définie comme étant la tendance du système à revenir en position centrale à partir d'une position inclinée.

Cette tendance est proportionnelle au couple restaurateur qui est le produit du poids de la caisse et de la distance séparant le centre de gravité du centre de roulis instantané du système. La figure 9.1 fait voir le trajet que suit le centre de gravité de la caisse selon son angle d'inclinaison.

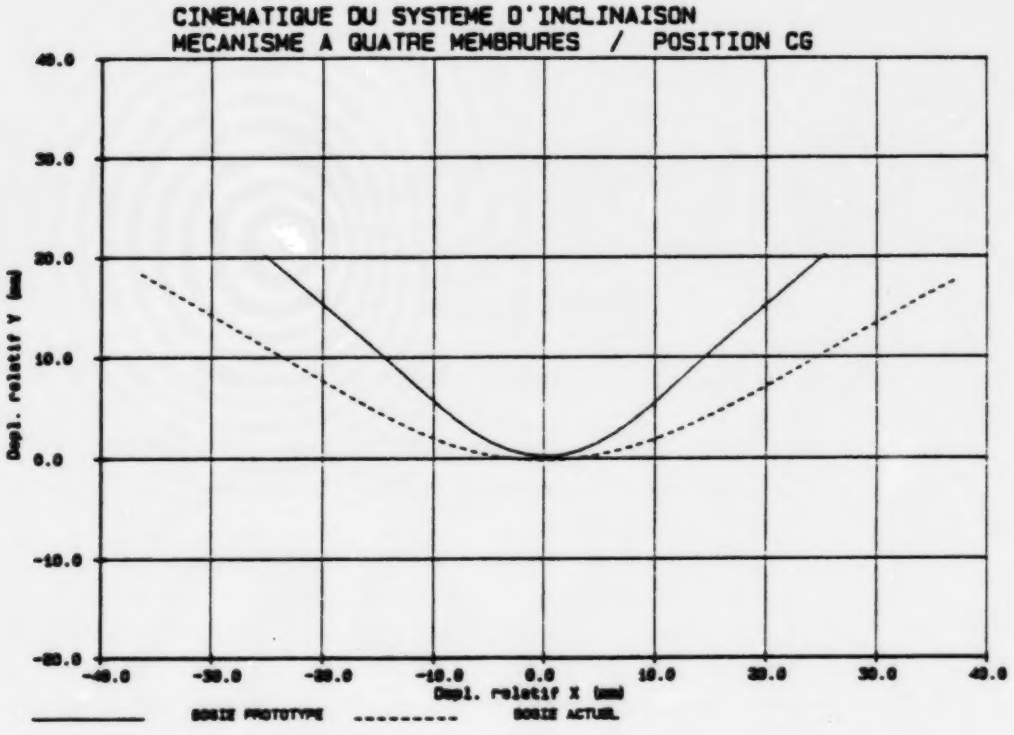


Figure 9.1

TRAJET DU CENTRE DE GRAVITÉ DE LA CAISSE

La stabilité du système est, en théorie, proportionnelle à la valeur absolue de la pente du trajet du centre de gravité de la caisse, du moment que la courbe de trajet est en forme de cuvette. En pratique, la stabilité du système est affectée par les forces de friction présentes dans le système et par les réactions des suspensions latérale et verticale du bogie.

Le nouveau système est plus stable que le système du bogie LRC Dofasco. Cette caractéristique du nouveau système est avantageuse mais aura pour effet d'engendrer des pressions hydrauliques plus élevées dans le système.

9.2.2 Étude de la puissance hydraulique requise

Ces analyses ont été faites pour déterminer les pressions hydrauliques d'opération et les dimensions des cylindres. Elles ont été importantes pour vérifier la compatibilité hydraulique des composants du système d'inclinaison actuellement utilisé sur les voitures LRC.

Les résultats des analyses préliminaires montrent qu'il est possible d'utiliser les composants du système actuel à l'exception peut-être des soupapes de contrôle des cylindres d'inclinaison qui semblent avoir une capacité marginale.

9.3 ANALYSE DE LA RÉPONSE DU SYSTÈME

Le modèle mathématique utilisé sert à prédire la réponse et la variation de l'angle de phase du système en fonction de la fréquence. Il inclut des formules mathématiques qui représentent chacun des sous-ensembles du système tels que schématisés sur le diagramme de la page suivante (Figure 9.2).

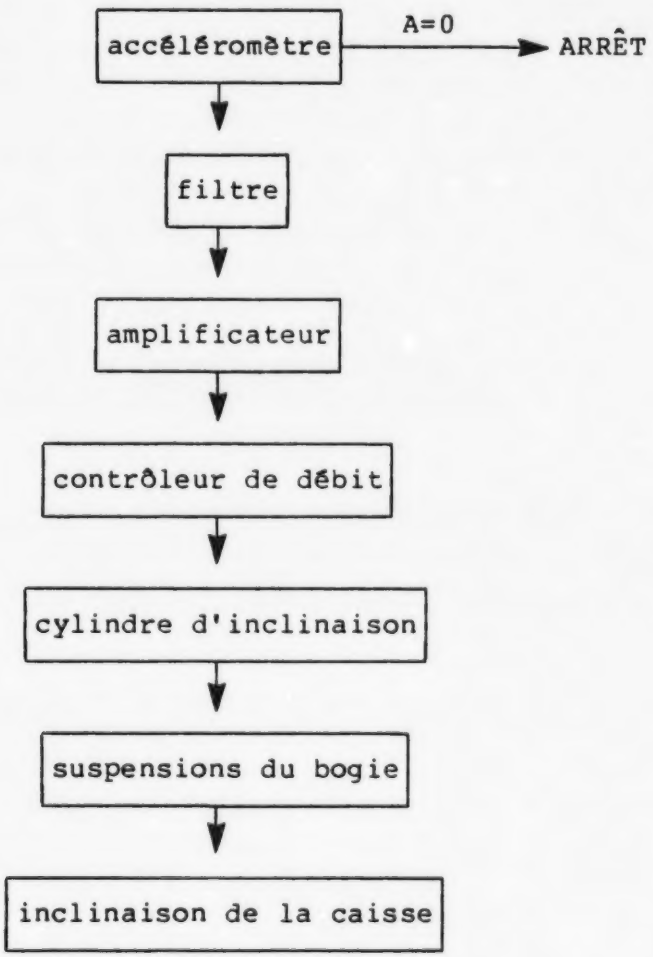


Figure 9.2

TRAJET DU SIGNAL DANS LE SYSTÈME D'INCLINAISON

9.3.1 Revue du modèle mathématique

À partir d'un signal donné d'accélération latérale, le modèle reproduit le comportement des divers éléments du système (Figure 9.2) pour finalement obtenir une réaction en boucle fermée, réaction qui ne se terminera que lorsque la caisse sera assez inclinée pour annuler le signal d'accélération latérale.

Les résultats de l'analyse permettent de vérifier l'effet d'une modification ou d'un réajustement du système.

En résumé, les travaux faits en phase I font ressortir les points suivants:

- Le modèle n'est pas encore assez raffiné pour bien reproduire les différents cas d'excitations;
- la rigidité en roulis de la suspension primaire agit de façon significative sur la réponse du système;
- d'autres essais instrumentés devront être faits pour valider le modèle;
- le modèle devra être raffiné jusqu'à ce que la réponse du système puisse être prédite et ce pour différentes conditions d'entrée en courbe.

SECTION 10

INTÉGRATION DU BOGIE À UNE CAISSE LRC

10.1 INTRODUCTION

À la suite de la décision prise au début de la phase I concernant le choix d'un bogie à empattement long et à roulements extérieurs, il a fallu vérifier l'espace réservé au bogie sous une caisse LRC. Les premiers examens ont montré qu'il faut agrandir cet espace de même que modifier les points d'attache du bogie à la caisse.

La présente section résume les résultats des travaux de conception effectués à l'interface caisse/bogie.

10.2 PARAMÈTRES CONSIDÉRÉS POUR L'ÉTUDE D'INTERFACE

Avant d'effectuer les premières analyses, les paramètres suivants ont été définis:

En vertical:
- jeu de la suspension primaire;
- jeu de la suspension secondaire;
- hauteur du plancher;
- dégagement bogie/caisse minimum requis.

En latéral:
- jeu de la suspension primaire;
- jeu de la suspension secondaire;
- dégagement bogie/caisse minimum requis.

Rotation du bogie:
- courbe de rayon minimum.

Roulis de la caisse:
- angle maximal de roulis;
- inclinaison maximale de la caisse.

Etc.

Pour effectuer une analyse complète il a fallu, en dernier lieu, combiner tous les paramètres pour simuler la pire des conditions.

10.3 MODIFICATIONS À APPORTER

Les modifications à apporter sont:

- La hauteur du plancher : pour avoir la possibilité d'utiliser le système d'inclinaison en plus des roues de 914 mm, la hauteur du plancher doit être de 1 245 m.
- L'espace réservé au bogie : cet espace doit être élargi pour accommoder le nouveau bogie.
- La traverse de charge : ce sous-ensemble doit être modifié pour accommoder la traverse de liaison du bogie.
- La tuyauterie : la tuyauterie devra être déplacée en fonction de la géométrie de la traverse de liaison.
- Les brancards : on devra modifier l'intérieur des brancards à cause des débattements latéraux engendrés lors de l'inclinaison de la voiture.

À la figure 10.1, on peut voir les dégagements disponibles entre la caisse et le bogie lorsque la caisse est inclinée de 7,5° et que la voiture roule dans une courbe de rayon minimum (76 m).

Les travaux d'ingénierie de détails de l'interface caisse/bogie seront effectués en phase II.

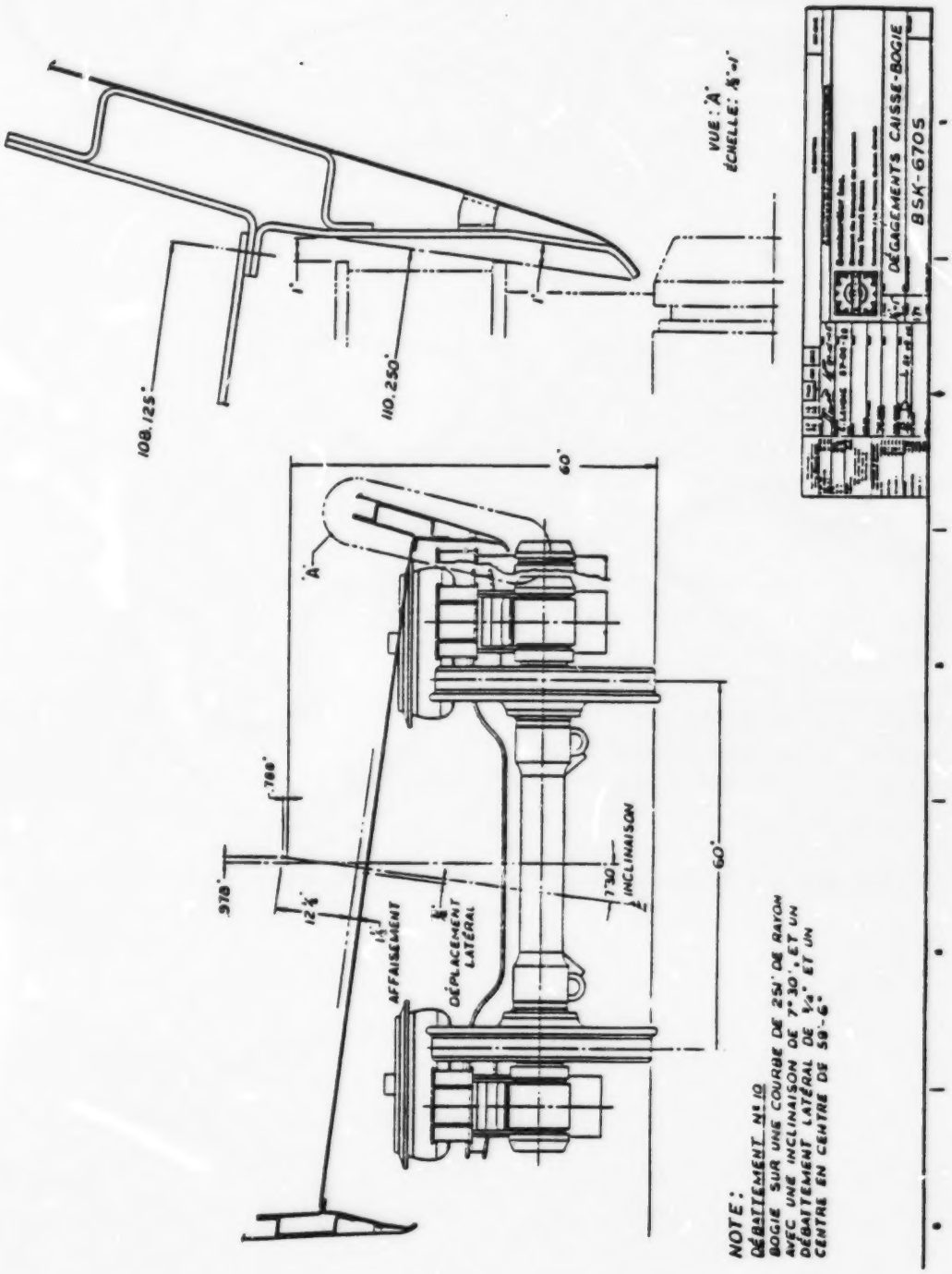


Figure 10.1

DÉGAGEMENTS CAISSE/BOGIE

SECTION 11

AUTRES ASPECTS

11.1 POIDS

Même si la question du poids est secondaire lors d'une étude conceptuelle, l'ensemble du concept a quand même été orienté de manière à obtenir un poids total minimum.

Il est important de mentionner que l'économie de poids ne peut être faite sur les composants de l'essieu. En effet, l'essieu, les roues, les roulements et les disques représentent près de 50 % du poids total du bogie. Ces composants doivent être conformes aux normes AAR et ne peuvent pas par conséquent être allégés.

Cependant, on peut optimiser la géométrie des éléments structuraux et choisir des composants qui seront optima des points de vue poids versus performances.

La liste des poids des différents sous-ensembles se retrouve au tableau 11-1.

TABLEAU 11-1

POIDS

Sous-ensembles	Poids (kg)
Essieux assemblés (pour 2)	3870
Châssis	2650
Traverse d'inclinaison	840
Traverse de liaison (non incluse au total)	500
Composants	500
	7860 kg

Il est permis de croire que le poids total du bogie sera d'environ 8 tonnes métriques, poids comparable, si on exclut la traverse d'inclinaison, au poids des bogies haute vitesse déjà étudiés.

11.2 FACILITÉ D'ENTRETIEN

Les diverses visites d'ateliers d'entretien des bogies nous ont appris que la "philosophie" d'entretien des Européens et des Japonais est fort différente de la nôtre. Autant l'entretien du matériel est une activité normale en Europe et au Japon, autant ici, on cherche à l'éviter.

Par exemple, il est normal en Europe de renverser certains bogies pour remplacer des composants. De telles pratiques sont ici inacceptables. Donc, considérant les contraintes relatives à l'entretien en Amérique, il a fallu orienter le design du bogie de manière à rendre l'entretien le plus facile possible. Nous avons donc porté une attention toute particulière aux trois sous-ensembles du bogie qui nécessitent le plus d'heures d'entretien. Ces sous-ensembles sont la liaison essieu/châssis, la liaison caisse/bogie et les suspensions primaire et secondaire.

11.2.1 Liaison caisse/bogie

Parmi les configurations étudiées, celle que nous avons choisie permet à la fois de séparer très rapidement et sans puits d'accès, le bogie de la caisse. Elle permet aussi d'ajuster rapidement la hauteur du plancher après un reprofilage des roues.

11.2.2 Liaison essieu/châssis

Nous avons examiné plus de deux douzaines de concepts et avons décidé de modifier et d'adapter le concept bielle qui facilite le remplacement des essieux. Ce genre d'opération doit souvent être répétée c'est-à-dire aux inspections et/ou remplacements des roues, des roulements, des disques de

freinage ou lorsque le reprofilage des roues est nécessaire (sauf s'il y a un tour en fosse).

11.2.3 Suspensions primaire et secondaire

Ces deux sous-ensembles doivent être inspectés régulièrement pour conserver les performances dynamiques du bogie.

Les suspensions primaire et secondaire du bogie ont été conçues pour faciliter leurs inspections. La position des amortisseurs a été choisie de façon à faciliter leurs inspections visuelles et leurs remplacements s'il fuient sévèrement.

11.3 FIABILITÉ

Les conditions d'opération des bogies au Canada sont parmi les plus difficiles au monde, principalement à cause des grands écarts de température, de la neige, de la glace et des conditions des voies.

Pour illustrer ceci, disons seulement que la rigidité de la voie peut varier par un facteur de près de 10 entre les conditions de voies gelées et les conditions durant la période de dégel (avril). De plus, les déviations latérales et verticales de la voie sont en général plus importantes qu'en Europe ou qu'au Japon. La neige et surtout la glace sont aussi très néfastes surtout pour les boyaux et câbles électriques montés sur le bogie.

Toutes ces conditions ont été prises en considération dès le début de l'étude conceptuelle.

SECTION 12

CONCLUSION

L'étude de faisabilité a démontré qu'il est possible de développer un concept de bogie répondant aux exigences de performances, de fiabilité et de facilité d'entretien. Ce bogie sera conçu pour des applications interurbaines et sera adaptable à des applications banlieue. Suite aux conclusions de l'étude, la Division du transport en commun de Bombardier propose de poursuivre la réalisation du projet.

BIBLIOGRAPHIE

BOMBARDIER DTC, Rapport final Bogie prototype 1984.

BOYD, SCOFIELD & ZAIKO, High Cant Deficiency Testing of the LRC, the AEM-7 locomotive and the Amcoach. Washington, Department of Transportation, January 1982, DOT-FR-81-06.

HARRIS and CREDE, Shock and Vibration Handbook, second edition, McGraw-Hill, 1976.

KOFFMAN, J.L., "Rotational Resistance of Modern Bogies", Rail Engineering Int'l, Sept 1973.

LORD Corporation, Elastomeric Suspension for Railway Vehicles, LL-2137.

Gouvernement du Québec
Ministère
des Transports